

Dimensionamiento y análisis de operación de sistemas fotovoltaicos a partir de herramientas  
computacionales

Anyela Marcela Arenas Lara, Karen Yesenia Arias Romero, Eduard Rodrigo Galvis González,  
Yeny Alejandra Ortiz Lizcano Y Juan Manuel Villamil Padilla

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electricista

Director

German Alfonso Osma Pinto

PhD. en Ingeniería (Ing. Eléctrica, Electrónica y Gestión & Desarrollo)

Codirectores

Alejandro Parrado Duque

Ingeniero Electricista

Alejandra Martínez Peñaloza

Ingeniera Electricista

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Semillero de Investigación en Generación Distribuida

Bucaramanga

2020

### **Dedicatoria**

*A Dios por darme la fortaleza y sabiduría para culminar esta etapa importante de mi vida.*

*A mis padres Jesús, Neyfi y hermanos que desde la distancia me apoyaron y me brindaron confianza, siendo ellos la mayor motivación para seguir adelante con este proyecto de vida.*

*Gracias por su amor, educación y porque nunca dejaron de creer en mí.*

*Al profesor German Osma, y a los ingenieros Alejandro Parrado y Alejandra Martínez, por su orientación y colaboración durante la ejecución del seminario de investigación.*

*A mis compañeros de trabajo de grado, por su paciencia y dedicación.*

*Por último, a todas aquellas personas que realmente estuvieron conmigo durante mi vida universitaria y aportaron a mi crecimiento personal y profesional.*

***Anyela Marcela Arenas Lara***

*A Dios por darme la sabiduría para culminar esta etapa tan importante de mi vida.*

*A mis padres y hermanos, que con su amor, paciencia y dedicación me acompañaron en todo momento, siendo mi mayor motivación para seguir adelante sin importar las circunstancias.*

***Karen Yesenia Arias Romero***

*A Dios por darme la sabiduría y oportunidad de culminar esta etapa importante de mi vida.*

*A mis padres Rodrigo e Hilda y hermanos Román, Alexis y Jorge, que con su paciencia y dedicación me acompañaron en todo momento, siendo mi guía para tomar las decisiones correctas.*

*Al profesor German Osma, y a los ingenieros Alejandro Parrado y Alejandra Martínez, por su orientación y colaboración durante la ejecución de este proyecto.*

*A mis compañeros del trabajo de grado, por su paciencia y dedicación en este proceso que estamos culminando.*

*Por último, a todas aquellas personas que conocí durante mi vida universitaria y aportaron a mi crecimiento personal y profesional.*

***Eduard Rodrigo Galvis González***

*A Dios, por darme la fuerza y capacidades para cumplir mis sueños.*

*A mis padres, Manuel y Luz Marina por su apoyo incondicional y amor.*

*Al profesor German Osma, y a los ingenieros Alejandro Parrado y Alejandra Martínez, por su orientación y colaboración durante la ejecución del seminario de investigación*

*Por último, a todas aquellas personas que conocí durante mi vida universitaria y aportaron a mi crecimiento personal y profesional.*

***Juan Manuel Villamil Padilla***

*A Dios, por darme la fuerza y capacidades para cumplir mis sueños.*

*A mis padres, Alba y Cristian por su apoyo incondicional, amor y sabiduría, porque han sido  
mi mayor motivación.*

*A mi hermanita, Johana por ser mi confidente, mi consejera y un gran apoyo en cada  
momento.*

*A Juan Carlos, por su amor, compañía y paciencia en todo este proceso.*

*A mis abuelos porque siempre me tienen en sus oraciones, por su amor, calidez y sabiduría.*

*A mis amigos los chinchitos, Yulieth, Andrés, Jeison, Julián, Juan Carlos, Carlitos y Fabian  
con quienes compartí desde el primer día en la universidad, días, tardes y noches de estudio y  
alegrías.*

*A Diana, Leidy y el profesor Oscar quienes confiaron en mi durante muchos años, fue un  
valioso aprendizaje mi labor como auxiliar.*

*Al Profesor German Osma, Alejandro Parrado y Alejandra Martínez porque me brindaron  
sus conocimientos y experiencia en mi formación académica, personal y profesional.*

*Y en general, a todas aquellas personas que día a día aportaron un granito de arena en mi  
formación.*

***Yeny Alejandra Ortiz Lizcano***

### **Agradecimientos**

*En primer lugar, a Dios, por permitirme cumplir mis metas y por darme la fortaleza necesaria para afrontar los obstáculos a lo largo de este camino.*

*A mis padres, por su cariño, amor, educación, apoyo incondicional y comprensión brindada durante toda mi carrera y mi vida. Gracias por creer en mí y demostrarme su amor infinito.*

*A mis hermanos, por ser mis amigos incondicionales y estar en todos los procesos de mi vida, apoyándome y motivándome a ser cada día mejor persona.*

*A mis nonitos, por estar siempre orgullosos de mí y ser mis mejores maestros en la universidad de la vida.*

*Al profesor German Osma, y a los ingenieros Alejandro Parrado y Alejandra Martínez, por su orientación y colaboración durante la ejecución de este proyecto.*

*A mis compañeros del trabajo de grado, por su paciencia y dedicación brindada a lo largo del seminario “tóxico”.*

*A mis mejores amigas, por estar a mi lado en cada momento y por brindarme su ayuda desinteresada en los momentos que más lo necesité.*

*Por último, a las personas que conocí en esta etapa, profesores, compañeros y amigos, que de alguna manera aportaron en mi vida profesional y personal.*

***Karen Yesenia Arias Romero***

**Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción	18
1. Conceptos para el dimensionamiento de SFV	22
1.1 Estimación del uso energético	24
1.2 Variables climatológicas	27
1.2.1 Radiación solar	27
1.2.2 Irradiancia	27
1.2.3 Irradiación	28
1.3 Temperatura de operación del panel FV	28
1.4 Arreglo de paneles FV	30
1.5 Inversor	30
1.6 Sistema de almacenamiento y controlador/regulador	31
1.7 Parámetros de selección de equipos	32
1.8 Tipos de SFV	33
1.8.1 SFV conectados a la red	33
1.8.2 SFV aislado	36
1.9 Conceptos complementarios de los SFV	39
1.9.1 Índice de rendimiento para SFV	39
1.9.2 Producción específica ( $Y_f$ )	40

---

1.9.3 Marco legal y regulatorio	41
2. Herramientas computacionales	42
2.1 Selección de las herramientas de cómputo	42
2.2 Herramientas de cómputo seleccionadas	50
2.3 Disposiciones legales y regulatorias vigentes en Colombia	54
3. Dimensionamiento de los cuatro SFV	56
3.1 Proceso de dimensionamiento	57
3.1.1 Estimación del uso energético	57
3.1.2 Irradiación solar incidente	58
3.1.3 Paneles FV	61
3.1.4 SFV conectado a la red	62
3.1.5 SFV aislados	63
3.2 Información de los SFV a dimensionar	66
3.3 Comparación de las características de las herramientas de cómputo	69
4. Análisis de operación	74
4.1 SFV conectado a la red de la vivienda unifamiliar	74
4.2 SFV conectado a la red UIS	78
4.3 SFV aislado de la finca residencial	82
4.4 SFV aislado de la finca agropecuaria	88
4.5 Ventajas y desventajas a partir de los resultados entregados por cada software	93
5. Entregables del seminario de investigación	95
6. Trabajos futuros	96
7. Conclusiones	97

---

Referencias Bibliográficas	100
Apéndices	110

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Capacidad instalada solar FV global.	18
Figura 2. Tendencia en capacidad instalada en Colombia.	19
Figura 3. Estructura del libro del seminario de investigación	22
Figura 4. Tópicos para el dimensionamiento de SFV.	23
Figura 5. Interacción del SFV aislado y vivienda	25
Figura 6. Interacción del SFV conectado a la red y vivienda	25
Figura 7. Demanda de potencia y energía.	26
Figura 8. Curva I-V a diferentes temperaturas.	29
Figura 9. Curva P-V a diferentes temperaturas.	29
Figura 10. Esquema de conexión del SFV conectado a la red.	34
Figura 11. Curvas de operación del SFV conectado a la red	34
Figura 12. Esquema de conexión del SFV aislado (referencia).	37
Figura 13. Curvas de operación del SFV aislado.	38
Figura 14. Porcentaje de utilización de las herramientas consultadas.	48
Figura 15. Tipos de conexión del SFV aislado. Fuente: Autores	52
Figura 16. Etapas para dimensionar los SFV. Fuente: Autores	56
Figura 17. Desempeño mensual del SFV (vivienda unifamiliar)	76
Figura 18. Excedentes y autoconsumo del SFV (vivienda unifamiliar)	77

Figura 19. Desempeño mensual del SFV (UIS)	79
Figura 20. Excedentes y autoconsumo del SFV (UIS)	81
Figura 21. Desempeño mensual del SFV (finca residencial)	84
Figura 22. Demanda atendida por el SA (finca residencial)	85
Figura 23. SOC promedio mensual del SFV (finca residencial)	86
Figura 24. Energía exportada del SFV (finca residencial)	87
Figura 25. Desempeño mensual del SFV (finca agropecuaria)	89
Figura 26. Demanda atendida por el SA (finca agropecuaria)	90
Figura 27. Estado de carga promedio del SA (finca agropecuaria)	91
Figura 28. Energía exportada a la red del SFV (finca agropecuaria)	92

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Etapas de dimensionamiento de los SFV	23
Tabla 2. Características de los inversores on-grid y off-grid	31
Tabla 3. Descripción del SA y controlador/regulador	31
Tabla 4. Parámetros de selección de equipos de los SFV	32
Tabla 5. Casos de operación del SFV conectado a la red	36
Tabla 6. Casos de operación del SFV aislado	38
Tabla 7. Resoluciones y decretos vigentes en Colombia	41
Tabla 8. Documentos asociados a herramientas de cómputo para la simulación de los SFV	44
Tabla 9. Comparación de las herramientas de cómputo encontradas en la base de datos del IEEE	49
Tabla 10. Información general de las herramientas de cómputo seleccionadas	50
Tabla 11. Características principales de las herramientas de cómputo	51
Tabla 12. Consideraciones CREG 030/2018 y CREG 038/2018	55
Tabla 13. Estrategias de estimación de uso de energía	57
Tabla 14. Herramientas meteorológicas de cada software	59
Tabla 15. Variables de entrada y salida de los SFV	60
Tabla 16. Opciones para definir la CI del SFV	62
Tabla 17. Formas de dimensionar el SA	66

Tabla 18. Características principales del panel FV	66
Tabla 19. Características de las localidades de los cuatro casos de estudio	67
Tabla 20. Resultados de dimensionamiento del SFV conectado a la red	67
Tabla 21. Resultados de dimensionamiento del SFV aislado	69
Tabla 22. Cumplimiento de cada ítem de comparación	70
Tabla 23. Cantidad de criterios cumplidos por cada software	71
Tabla 24. Símbolo e indicador de valor	72
Tabla 25. Características de comparación de las funcionalidades	72
Tabla 26. Dimensionamiento del SFV (vivienda unifamiliar)	75
Tabla 27. Excedentes y autoconsumo del SFV (vivienda unifamiliar)	76
Tabla 28. Mejor y peor día de generación del SFV (vivienda unifamiliar)	78
Tabla 29. Dimensionamiento del SFV (UIS)	78
Tabla 30. Excedentes y autoconsumo del SFV (UIS)	81
Tabla 31. Mejor y peor día de generación del SFV (UIS)	82
Tabla 32. Dimensionamiento del SFV (finca residencial)	82
Tabla 33. Mejor y peor día de generación del SFV (finca residencial)	87
Tabla 34. Dimensionamiento del SFV (finca agropecuaria)	88
Tabla 35. Mejor y peor día de generación del SFV (finca agropecuaria)	92
Tabla 36. Características identificadas en el análisis de resultados de las herramientas de cómputo	93
Tabla 37. Parámetros de dimensionamiento y operación de los SFV	94
Tabla 38. Contenido de los entregables del seminario de investigación	95

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Características de la modalidad del trabajo de grado: seminario de investigación	110
Apéndice B. Cumplimiento de los criterios de comparación en las herramientas computacionales seleccionadas	116
Apéndice C. Pérdidas consideradas por cada software	122
Apéndice D. Operación diaria de los SFV dimensionados	124

### Índice de Abreviaturas

AC	Corriente alterna
ANLA	Autoridad Nacional de Licencias Ambientales
AGPE	Autogeneración a pequeña escala
CREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas
DC	Corriente directa
ESSA	Electrificadora de Santander S.A.
FNCE	Fuentes No Convencionales de Energía
FNCER	Fuentes No Convencionales de Energía Renovable
FV	Fotovoltaico
GD	Generador distribuido
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IVA	Impuesto al valor agregado
MME	Ministerio de minas y energías
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracker</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
NSRBD	<i>National Solar Radiation Data Base</i>
NTC	Norma Técnica Colombiana

---

OR	Operador de red
PCC	Punto de conexión común
PLOL	<i>Probability Loss Of Load</i>
pu	Por unidad
PWM	<i>Pulse – with modulation</i>
RO	Rango de operación
SA	Sistema de almacenamiento
SAM	<i>System Advisor Model</i>
SIN	Sistema Interconectado Nacional
SFV	Sistema(s) fotovoltaico(s)
SOC	<i>State of charge</i>
UIS	Universidad Industrial de Santander
UPME	Unidad de Planeación Minero-Energética
Wp	Watt pico
ZNI	Zonas no interconectadas

## Resumen

**Título:** Dimensionamiento y análisis de operación de sistemas fotovoltaicos a partir de herramientas computacionales<sup>1\*</sup>

**Autores:** Anyela Marcela Arenas Lara, Karen Yesenia Arias Romero, Eduard Rodrigo Galvis González, Yeny Alejandra Ortiz Lizcano, Juan Manuel Villamil Padilla<sup>2\*\*</sup>

**Palabras claves:** Dimensionamiento, herramientas de cómputo, sistema fotovoltaico

### Descripción:

La energía solar FV ha presentado un crecimiento considerable en los últimos años, implicando la necesidad de profundizar la formación de esta tecnología de generación. Por lo tanto, este trabajo de grado en modalidad de seminario de investigación abarca el proceso de dimensionamiento de SFV a partir de la apropiación de cuatro herramientas de cómputo, para un posterior análisis comparativo.

Inicialmente, se identifican los conceptos y etapas para el dimensionamiento de SFV a través de una revisión en la literatura y proyectos ya desarrollados. Luego, se procede a la búsqueda y selección de cuatro herramientas de cómputo a partir de la base de datos del IEEE, revisión de manuales y tutoriales. PVsyst, Solarius PV, PV\*SOL y SAM se escogen para el desarrollo del trabajo de grado. En cada herramienta seleccionada se cuantifican algunos conceptos (p.e. energía excedente, inyectada a la red, de autoconsumo y tomada de la red) para aplicar algunas disposiciones regulatorias vigentes en Colombia.

Posteriormente, se plantean dos SFV conectados a la red (vivienda unifamiliar y UIS) y dos SFV aislados (finca residencial y finca agropecuaria), ubicados en el departamento de Santander. Se realiza el dimensionamiento en cada herramienta escogida, para comparar las funcionalidades, establecer ventajas, desventajas y emitir un juicio de valor. Por último, se analiza el comportamiento de los SFV en cada herramienta a partir de los resultados obtenidos, comparando los parámetros de operación.

---

<sup>1\*</sup> Trabajo de grado

<sup>2\*\*</sup> Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: PhD. German Alfonso Osma Pinto. Codirectores: Ing. Alejandro Parrado Duque, Ing. Alejandra Martínez Peñaloza

## Abstract

**Title:** Sizing and analysis of photovoltaic systems operation through computational tools<sup>3\*</sup>

**Author:** Anyela Marcela Arenas Lara, Karen Yesenia Arias Romero, Eduard Rodrigo Galvis González, Yeny Alejandra Ortiz Lizcano, Juan Manuel Villamil Padilla<sup>4\*\*</sup>

**Keywords:** Sizing, computing tools, photovoltaic system

### Description:

Photovoltaic solar energy has shown considerable growth in recent years, implying the need to deepen the formation of this technology. Therefore, this work of degree in modality of research seminar includes the sizing process of photovoltaic systems based on the appropriation of four computation tools, for a later comparative analysis.

Initially, the concepts and stages for the sizing process of photovoltaic systems are identified through a review in the literature and projects already developed. Then, we proceed to search and select four computer tools from the IEEE database, revision of manuals and tutorials. PVsyst, Solarius PV, PV\*SOL and SAM are chosen for the development of the grade work.

In each selected tool, some concepts (e.g. surplus energy, injected into the grid, self-consumption and taken from the grid) are quantified to apply some regulatory provisions in force in Colombia.

Subsequently, two grid-connected photovoltaic systems (single-family home and UIS) and two isolated photovoltaic systems (residential farm and agricultural farm) are proposed, located in the department of Santander. The sizing is done on each chosen tool, to compare the functionalities, establish advantages, disadvantages and give a value judgment. Finally, the behavior of the photovoltaic system in each tool is analyzed based on the results obtained, comparing the operating parameters.

---

<sup>3\*</sup> Bachelor Thesis

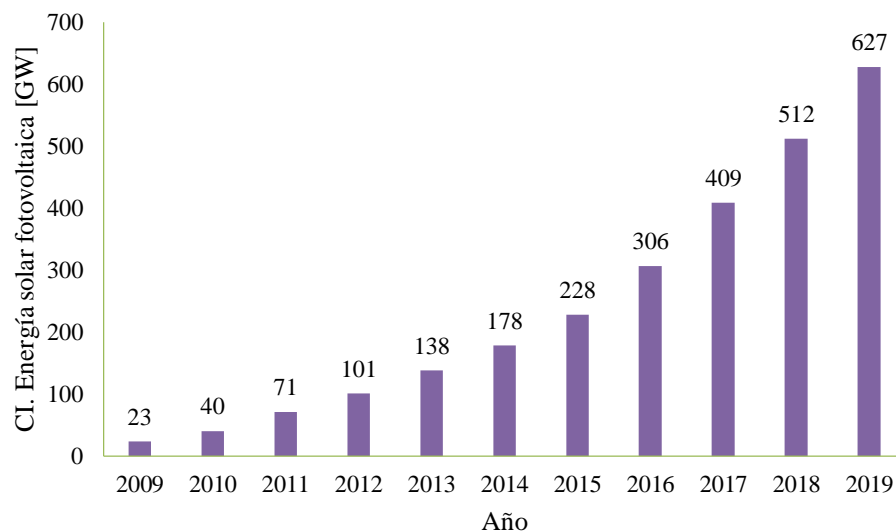
<sup>4\*\*</sup> Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: PhD. German Alfonso Osma Pinto. Codirectores: Ing. Alejandro Parrado Duque, Ing. Alejandra Martínez Peñaloza

## Introducción

La Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) afirma que la energía solar FV es una de las tecnologías de energía renovable de mayor crecimiento, la cual tendrá un papel importante en la futura combinación global de generación de electricidad (Agencia Internacional de Energías Renovables, n.d.). La Figura 1 muestra que en el año 2019 la capacidad instalada solar FV en el mundo aumentó 115 GW, siendo el mayor incremento de esta tecnología hasta el momento (REN21, 2020).

**Figura 1.**

*Capacidad instalada solar FV global.*

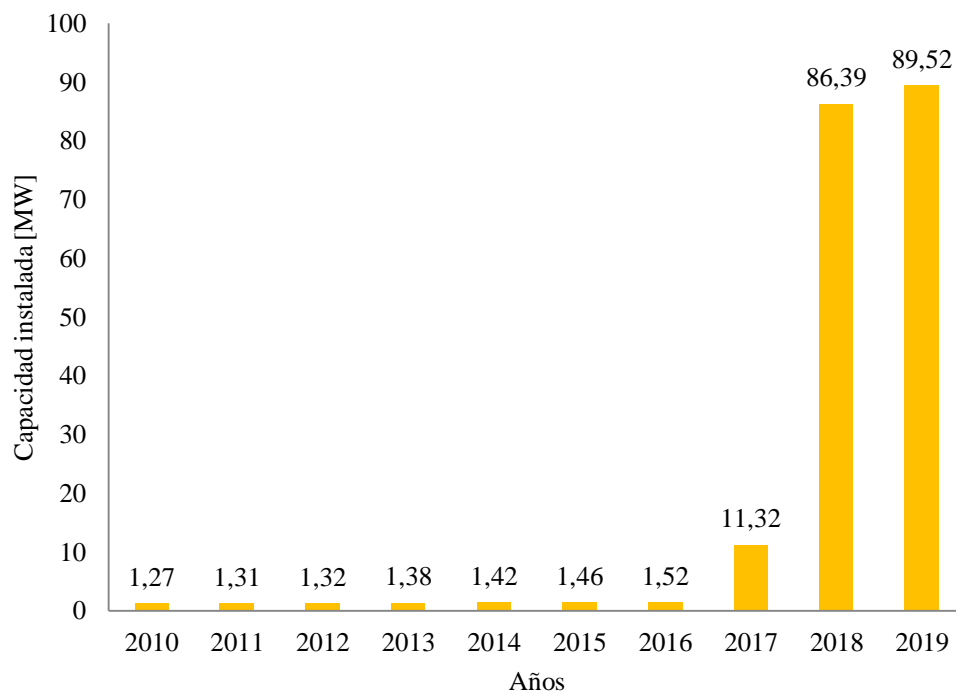


Nota. Adaptado de (REN21, 2020)

Según IRENA (Agencia Internacional de Energías Renovables, n.d.), Colombia presenta una tendencia considerable de crecimiento en su capacidad instalada solar FV en los últimos años como muestra la Figura 2. En consecuencia, es necesario fomentar la investigación y formación (a nivel profesional, tecnológico y técnico) de esta fuente de generación de energía.

### Figura 2.

*Tendencia en capacidad instalada en Colombia.*



Nota. Adaptado de (Agencia Internacional de Energías Renovables, n.d.)

La Universidad Industrial de Santander (UIS), a través de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T), educa profesionales en Ingeniería Eléctrica, los cuales abordan, de forma introductoria, la temática de generación FV en la asignatura Generación de Energía Eléctrica (de 8vo nivel). Por otra parte, en la modalidad de trabajos de

grado, algunos estudiantes profundizan en dimensionamiento, modelado, simulación, montajes o monitorización de sistemas FV (SFV) o componentes específicos de estos. No obstante, se evidencia el creciente interés nacional (políticas, regulación, empresas, etc.) en este tópico, por lo que es necesario ahondar en los esfuerzos para intensificar la formación en esta tecnología de generación y, así, estar en consonancia con la dinámica nacional e internacional.

Se considera que la necesidad descrita requiere de diversos esfuerzos como la apropiación de software de dimensionamiento, visitas técnicas, creación de una electiva y estudio de la regulación vigente. Con el fin de apoyar el mejoramiento de la E3T en sus capacidades de formación de futuros ingenieros electricistas, específicamente en la apropiación de herramientas de cómputo sobre dimensionamiento de SFV, se formuló este trabajo de grado en modalidad de seminario de investigación.

Esta modalidad de seminario de investigación permite adquirir habilidades interpretativas, argumentativas y propositivas, valiéndose de la formación para el trabajo tanto personal como en equipo sobre un tema específico (No & Bucaramanga, 2015). Por lo tanto, se considera una buena opción para apropiar cuatro herramientas de cómputo especializadas en el dimensionamiento de SFV.

Este trabajo de grado tuvo por objetivo general identificar los parámetros de dimensionamiento y operación de SFV para estudiar cuatro casos de estudio (dos SFV conectados a la red y dos SFV aislados) a través de un análisis comparativo considerando el uso de las herramientas computacionales PVsyst, PV\*SOL, Solarius PV y SAM.

Para dar cumplimiento con el objetivo general se plantearon como objetivos específicos: i) reconocer los conceptos que se requieren para el dimensionamiento de SFV, a partir de revisión de literatura; ii) identificar y seleccionar herramientas computacionales para el dimensionamiento

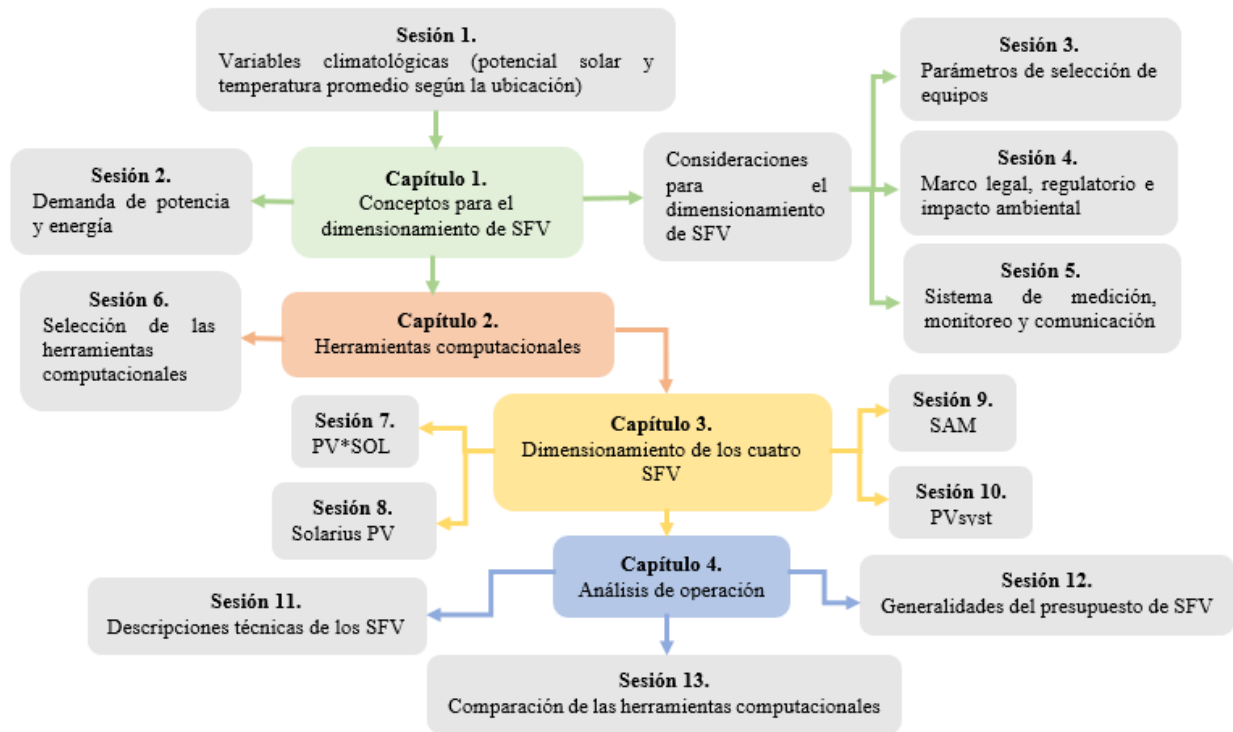
de SFV, a partir de la revisión de manuales y tutoriales, considerando las disposiciones legales y regulatorias vigentes en Colombia; iii) realizar el dimensionamiento de cuatro SFV (dos SFV aislados y dos SFV conectados a la red) que permitan comparar las funcionalidades de las herramientas computacionales seleccionadas; y iv) comparar los resultados obtenidos del dimensionamiento y análisis entregados por las herramientas computacionales seleccionadas para identificar fortalezas y debilidades de cada herramienta.

Para llevar a cabo este seminario de investigación, se programaron trece sesiones. Las temáticas fueron seleccionadas con la orientación de director y codirectores. Los cinco miembros del grupo asumieron los diferentes roles (relator, correlator, participantes, protocolante) que se muestran en el Anexo A.

La Figura 3 presenta la estructura del contenido del libro dividido en cuatro capítulos. En cada capítulo se incorpora información de las sesiones desarrolladas, así los cuatro capítulos en conjunto abarcan el objetivo general del seminario de investigación “Dimensionamiento y análisis de operación de sistemas fotovoltaicos a partir de herramientas computacionales”.

**Figura 3.**

*Estructura del libro del seminario de investigación*



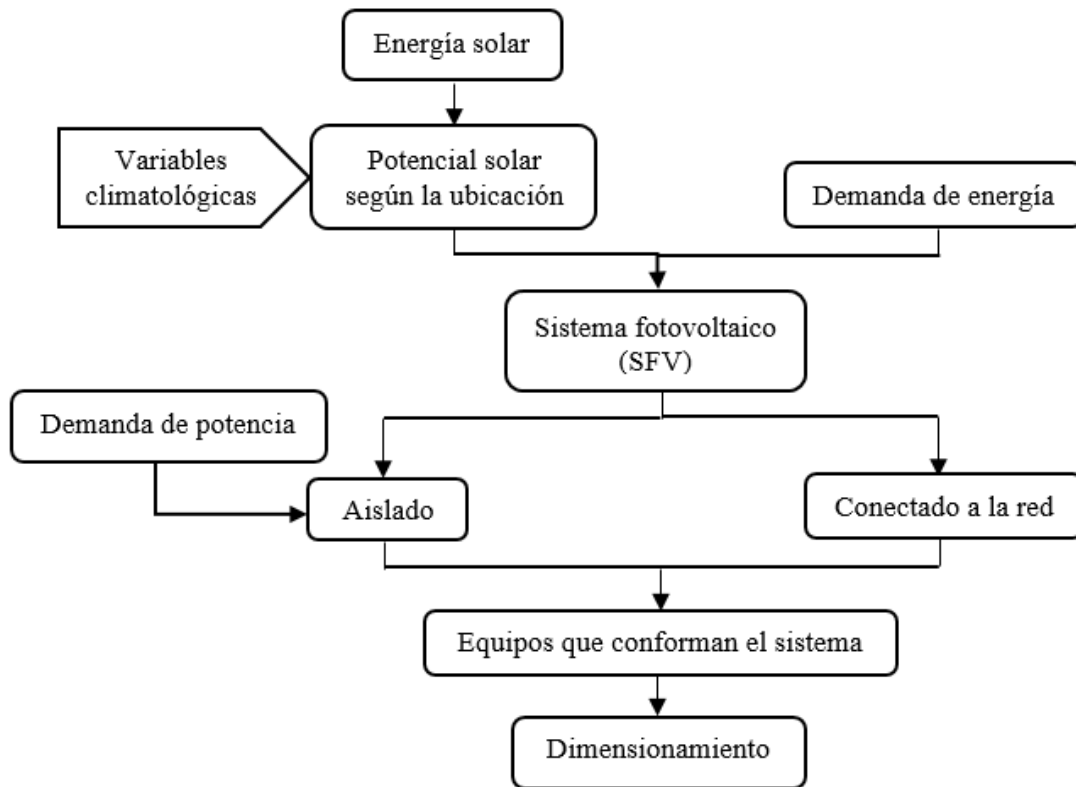
### 1. Conceptos para el dimensionamiento de SFV

La tarea fundamental del dimensionamiento de un SFV consiste en determinar el tamaño, parámetros y conexiones eléctricas adecuadas de los componentes principales del sistema (paneles FV, inversores, controladores/reguladores y baterías) (Aguilera & Hontoria, n.d.). Por tal motivo es importante estudiar los conceptos principales para el dimensionamiento de los SFV.

La Figura 4 presenta los tópicos de estudio que se consideraron al momento de realizar el dimensionamiento de los SFV (conectado a la red y aislado).

**Figura 4.**

*Tópicos para el dimensionamiento de SFV.*



Además, el seminario de investigación consideró las etapas descritas en la Tabla 1 para llevar a cabo el dimensionamiento de los SFV.

**Tabla 1.**

*Etapas de dimensionamiento de los SFV*

Etapa		Descripción
1	Estimación del uso energético	Se identifican las necesidades del usuario, las cuales se abastecerán con la instalación
2	Variables climatológicas	Se obtiene el potencial solar disponible en la zona de interés

<b>3</b>	Arreglo de paneles FV	Se realizan los cálculos para establecer el número de paneles FV en función de las condiciones de demanda de carga y las variables climatológicas
<b>4</b>	Inversor	El inversor debe cumplir con los requerimientos eléctricos dispuestos por los equipos a los que está conectado. Existen dos tipos: <i>on-grid</i> (SFV conectado a la red) y <i>off-grid</i> (SFV aislado)
<b>5</b>	Sistema de almacenamiento	Se definen los días de autonomía y la cantidad de baterías según las necesidades del usuario
<b>6</b>	Controlador o regulador	Se identifican valores de entrada y salida del equipo para su conexión en el SFV

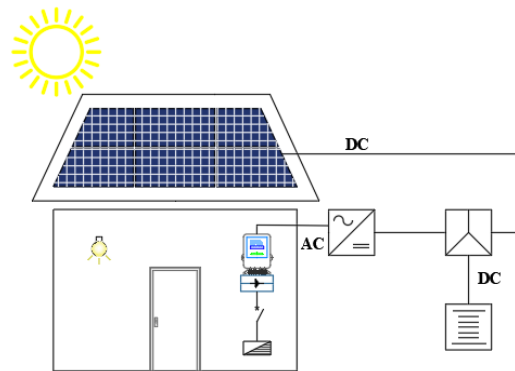
A continuación, se explican los conceptos que se deben tener en cuenta para cada etapa de dimensionamiento.

### 1.1 Estimación del uso energético

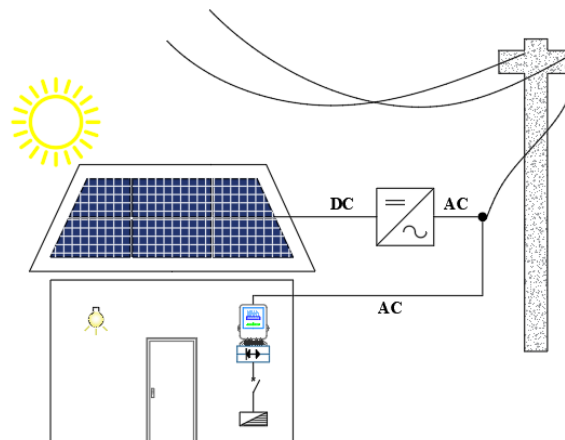
Es la cantidad de energía eléctrica que usan los diferentes dispositivos eléctricos o electrónicos que están presentes en los sectores residenciales, industriales, comerciales, y demás. Las figuras 5 y 6 muestran la interconexión del SFV aislado y conectado a la red eléctrica respectivamente.

**Figura 5.**

*Interacción del SFV aislado y vivienda*

**Figura 6.**

*Interacción del SFV conectado a la red y vivienda*



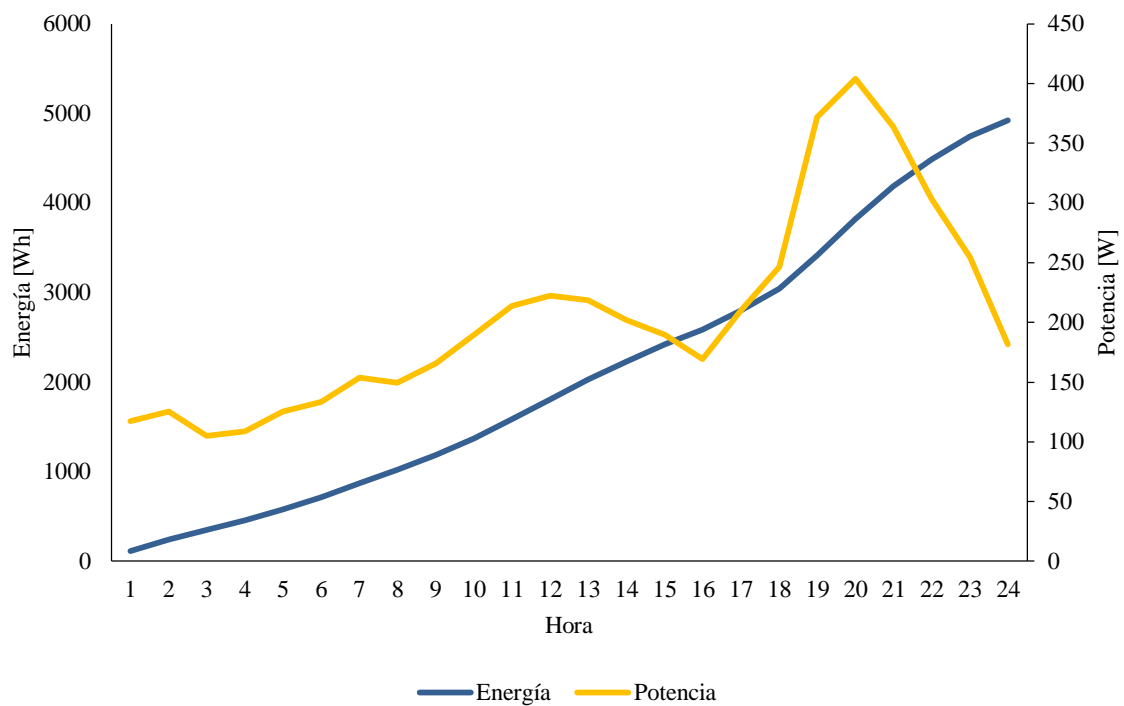
En esta etapa se deben tener claro dos conceptos:

- Demanda de potencia: es la potencia solicitada a la fuente de suministro en el punto de conexión en un momento determinado y las unidades son [VA] o [W] [5].
- Demanda de energía: es la energía solicitada a la fuente de suministro en el punto de conexión durante un periodo de tiempo determinado; por tanto, su unidad es [Wh] [5].

La Figura 7 ilustra la relación entre la demanda de potencia (curva naranja) y la demanda de energía (curva azul). Se identifica como la demanda de energía aumenta conforme avanza el día.

**Figura 7.**

*Demanda de potencia y energía.*



Con base en estos conceptos, se identifican las necesidades energéticas del usuario que va a instalar el SFV. La demanda de potencia se calcula de acuerdo con lo especificado por el Código Eléctrico Colombiano (NTC 2050 (Colombiana et al., n.d.)), norma técnica de cada región del país o por medio de un estudio de cargas. La demanda de energía se obtiene a partir de la sumatoria de la demanda de potencia en un intervalo de tiempo determinado.

## 1.2 Variables climatológicas

Para determinar el potencial solar de una zona se deben tener en cuenta las siguientes variables climatológicas:

### 1.2.1 Radiación solar

Es la energía emitida por el sol que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas, las cuales son producidas por la oscilación o la aceleración de una carga eléctrica [6].

### 1.2.2 Irradiancia

Describe la radiación solar que llega a la Tierra medida como una potencia instantánea por unidad de superficie [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]. Se denota con la letra **G** (Casa & Barrio, 2012). Existen distintos tipos de irradiancia:

- Irradiancia directa: es la irradiancia que incide sobre una superficie con un ángulo único y preciso sin ningún tipo de difusión ni reflexión [7].
- Irradiancia difusa: es la irradiancia que incide en una superficie después de sufrir un proceso de dispersión debido a gases atmosféricos y/u objetos circundantes [7].
- Irradiancia reflejada o albedo: es la irradiancia reflejada por un objeto circundante a la superficie de interés. Esta irradiancia varía dependiendo de las características del objeto como su nivel de opacidad, material y transparencia [7].

La irradiancia directa, difusa y reflejada o albedo sobre una superficie horizontal son las componentes de la irradiancia global horizontal.

### ***1.2.3 Irradiación***

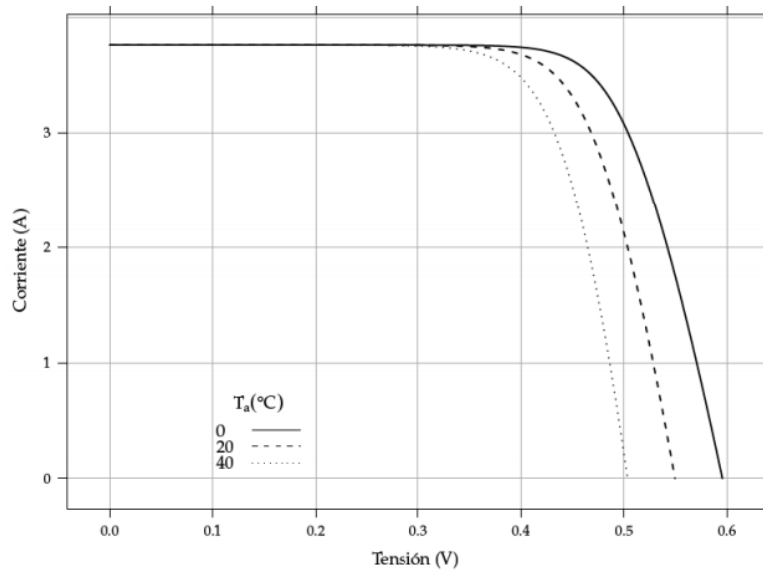
Es la irradiancia recibida en un lapso determinado de tiempo, es decir, la energía incidente en una superficie. Se mide en  $[\text{Wh}/\text{m}^2]$  o, en caso de un día, en  $[\text{Wh}/\text{m}^2/\text{día}]$ . Se denota comúnmente con la letra **H** (Casa & Barrio, 2012).

### **1.3 Temperatura de operación del panel FV**

Es la temperatura que alcanza la superficie del panel FV; varía a partir de la temperatura ambiente, irradiancia, entre otros, dependiendo de la ubicación del SFV. A medida que aumenta la temperatura de operación, la tensión y potencia de salida disminuyen, afectando la generación del panel FV (Óscarperpiñánlamigueiro et al., 2012). Las figuras 8 y 9 muestran el efecto de la temperatura ambiente en las curvas características I-V y P-V de un panel FV. Se evidencia cómo a distintas temperaturas ambiente (0 °C línea negra, 20 °C línea- y 40 °C línea punteada) se disminuye la tensión de salida y potencia entregada por el panel FV.

**Figura 8.**

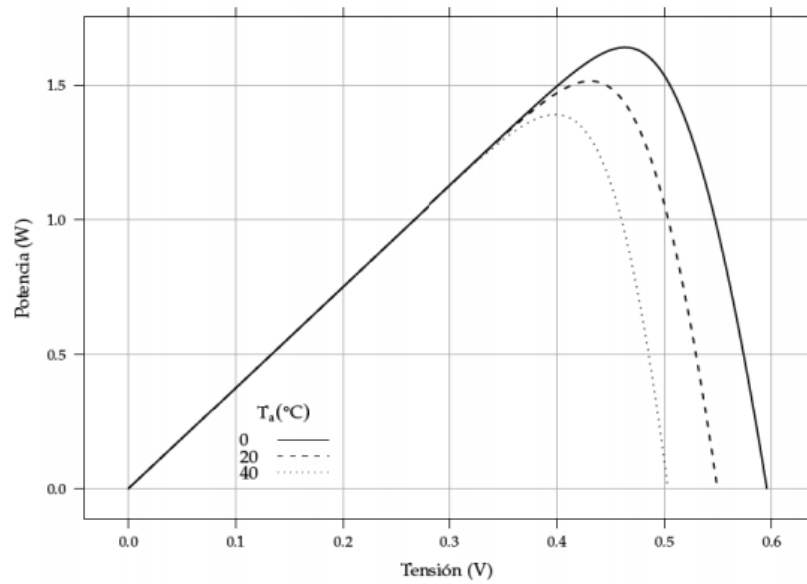
*Curva I-V a diferentes temperaturas.*



Nota. Tomado de (Óscarperpiñánlamigueiro et al., 2012)

**Figura 9.**

*Curva P-V a diferentes temperaturas.*



Nota. Tomado de (Óscarperpiñánlamigueiro et al., 2012)

#### 1.4 Arreglo de paneles FV

Un panel FV está formado por un conjunto de celdas conectadas eléctricamente, encapsuladas y montadas sobre una estructura de soporte o marco. Proporciona en su salida de conexión una tensión y corriente en DC (Tomás Díaz Corcobado & Guadalupe Carmona Rubio, n.d.).

Es posible hacer conexiones en serie y paralelo con los paneles FV para obtener a la salida diferentes valores de tensión o corriente en el arreglo FV. Las formas son:

- La conexión en serie permite aumentar la tensión final en los extremos del conjunto.
- La conexión en paralelo permite aumentar la intensidad de corriente total del conjunto.
- Otra forma es conectar paneles FV en serie-paralelo hasta obtener la potencia requerida.

Las tensiones y corrientes finales de operación de los paneles FV deben ser compatibles con las características técnicas de la unidad que los gestiona; un inversor *on-grid* en el caso del SFV conectado a la red o un controlador/regulador para el caso del SFV aislado [7].

#### 1.5 Inversor

El equipo de acondicionamiento de potencia, denominado inversor DC/AC, realiza la conversión con determinados requisitos de tensión eficaz, frecuencia y seguridad eléctrica. Algunos inversores cuentan con otros requisitos dependiendo de las exigencias de regulación u OR, por ejemplo: distorsión armónica de ondas de tensión y corriente, eficiencia entre otras

(Óscarperpiñánlamigueiro et al., 2012). La Tabla 2 presenta algunas características que pueden variar dependiendo de la utilidad de los inversores *on-grid* y *off-grid*.

**Tabla 2.**

*Características de los inversores on-grid y off-grid*

<b>Inversor <i>on-grid</i></b>	<b>Inversor <i>off-grid</i></b>
-Funcionamiento totalmente sincrónico con la red	-Señal de salida sinusoidal con baja distorsión armónica
-Arranque y sincronización automáticos en horas solares insuficientes	-Protección contra sobretensiones por apagado de equipos con cargas inductivas
-Apagado automático en ausencia de hora solar	-Capacidad de sobrecarga durante pequeños lapsos de tiempo
-Desconexión ante fallos de alimentación	-Capacidad de entregar corrientes elevadas durante pequeños lapsos de tiempo
-Seguimiento de potencia máxima sin problemas para un rango amplio de potencia	-Tensión y frecuencia estable de acuerdo con el tablero de distribución
-No sufre daños frente a exposición de altos voltajes de entrada durante pequeños lapsos de tiempo	-Alta eficiencia incluso cuando se tiene baja carga (Vilarino et al., 2014)
-Protección contra sobretensiones en los lados de corriente alterna y directa	
-No poseen la capacidad de controlar la dinámica de carga y descarga de una batería (Vilarino et al., 2014)	


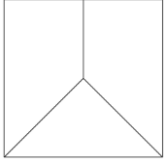
**1.6 Sistema de almacenamiento y controlador/regulador**

La Tabla 3 muestra las funciones que tienen el SA y el controlador/regulador.

**Tabla 3.**

*Descripción del SA y controlador/regulador*

<b>Equipo</b>	<b>Representación gráfica</b>	<b>Función</b>
---------------	-------------------------------	----------------

<p><b>Sistema de Almacenamiento</b></p>		<p>Está compuesto por baterías y cumple las función de suplir la demanda de energía y potencia pico de la carga cuando el arreglo de paneles FV no entregue la energía y potencia suficiente</p>
<p><b>Controlador/regulador</b></p>		<p>Controla, dispone y direcciona la energía en los sentidos adecuados para tener el correcto funcionamiento de sistemas FV aislados, protege a los equipos de daños y evita que el SA tenga sobrecargas y descargas profundas</p>

**1.7 Parámetros de selección de equipos**

Al momento de seleccionar los equipos, se tienen en cuenta características eléctricas y físicas. En las características físicas, se consideran el tamaño y peso de los equipos, debido a las vías de acceso a la ubicación o su instalación (área disponible o acondicionamiento de estructuras).

No obstante, como competencia de este trabajo de grado se consideran principalmente los parámetros eléctricos en el dimensionamiento de los SFV. Los parámetros eléctricos sirven como filtro en la selección de equipos, ya que permiten conocer la compatibilidad entre los componentes del SFV. La Tabla 4 presenta los parámetros de selección y conexión de cada equipo utilizado en los SFV.

**Tabla 4.**

*Parámetros de selección de equipos de los SFV*

<p><b>Panel FV</b></p>	<p>Punto de máxima potencia, tensión de circuito abierto (<math>V_{oc}</math>), corriente de cortocircuito (<math>I_{sc}</math>), tensión de máxima potencia (<math>V_{mp}</math>), corriente de máxima potencia (<math>I_{mp}</math>), eficiencia(<math>\eta</math>)</p>
<p><b>Inversor</b></p>	<p><i>On-grid</i>: potencia nominal y máxima (<math>P_{nom}</math>, <math>P_{m\acute{a}x}</math>), rango de tensión de búsqueda del punto de máxima potencia (MPPT), tensión máxima de entrada (<math>V_{m\acute{a}x}</math>), tensión nominal de salida (<math>V_{nom}</math>), umbral de tensión y</p>

	corriente en el arranque, rango de frecuencia (Hz), corriente máxima de entrada ( $I_{m\acute{a}x}$ )
	<i>Off-grid</i> : potencia nominal y máxima ( $P_{nom}$ , $P_{m\acute{a}x}$ ), tensión y corriente máxima de entrada ( $V_{m\acute{a}x}$ , $I_{m\acute{a}x}$ ), tensión nominal de salida ajustable ( $V_{nom}$ ), umbral de tensión y corriente en el arranque, frecuencia ajustable (Hz).
<b>Sistema de almacenamiento</b>	Capacidad nominal, régimen de carga/descarga, estado de carga mínimo ( $SOC_{m\acute{i}n}$ ), tensión de corte, eficiencia energética
<b>Controlador o regulador</b>	Tensión nominal ( $V_{nom}$ ), corriente máxima en descarga ( $I_{dc}$ descarga), corriente máxima de carga ( $I_{dc}$ carga), sobrecarga admisible y tensión de desconexión

### 1.8 Tipos de SFV

Un SFV es un conjunto de diferentes componentes eléctricos encargados de transformar y acondicionar la energía solar en energía eléctrica. Existen dos tipos de SFV: conectado a la red y aislado; estos sistemas tienen en común los paneles FV y el inversor.

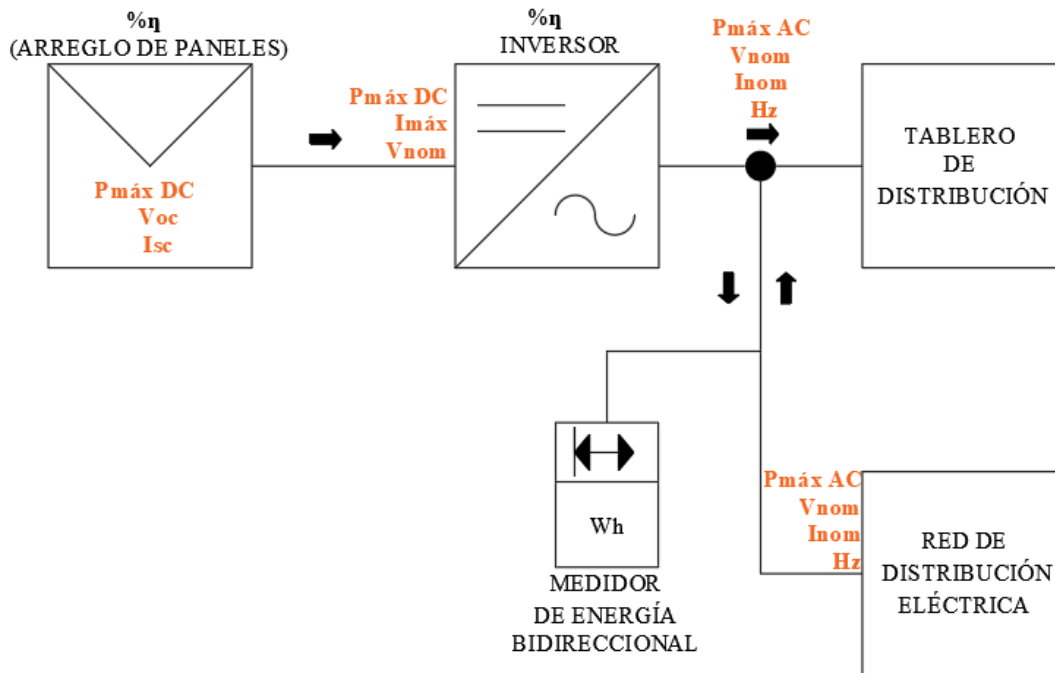
#### 1.8.1 SFV conectados a la red

Son aquellos que están conectados a una red de distribución eléctrica. Este tipo de SFV satisface parte de la demanda de las cargas, ya que la fuente primaria es la red eléctrica que suministra la energía en dos condiciones: durante las horas que no hay recurso solar (p.e. 6 p.m. a 6 a.m.) y durante el tiempo de potencial solar cuando el SFV genera menor potencia que la demandada por la carga. Nótese que el SFV inyecta excedentes a la red eléctrica cuando la potencia generada es mayor a la demanda de potencia de la carga.

La Figura 10 presenta el esquema de conexión y los equipos que conforman el SFV conectado a la red, estos equipos van conectados al PCC. Se exige el uso de medidores bidireccionales para medir la energía que se inyecta y usa de la red.

**Figura 10.**

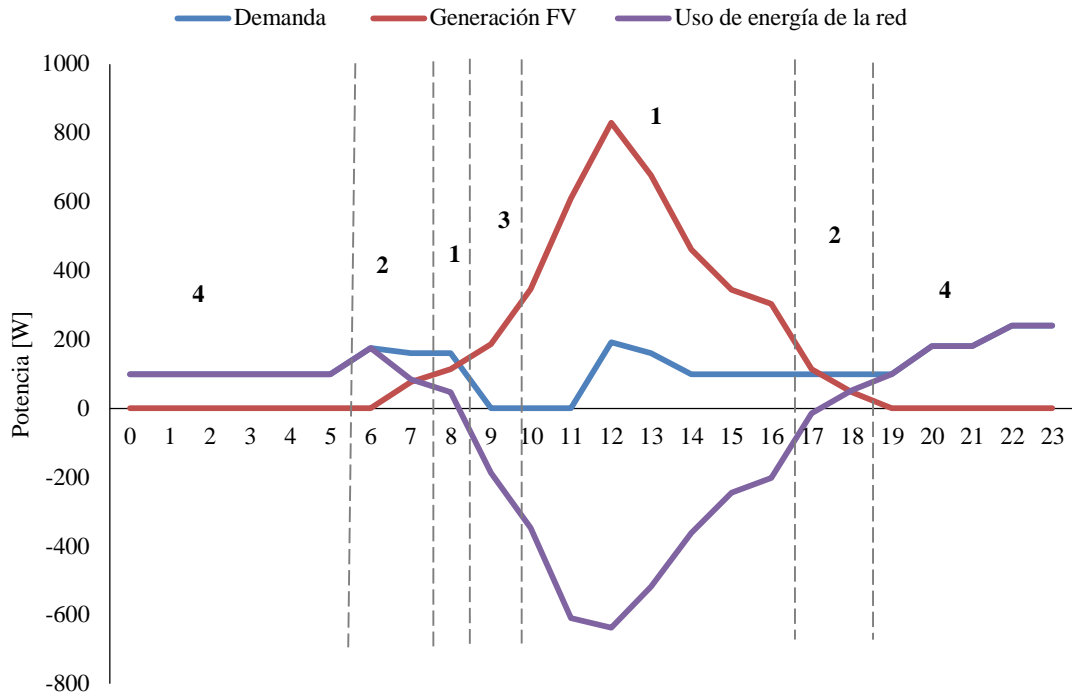
*Esquema de conexión del SFV conectado a la red.*



La Figura 11 ilustra la relación entre la generación del SFV (curva naranja), demanda energética (curva azul) y el uso de energía de la red (curva amarilla). La curva amarilla puede tomar valores negativos indicando que se está inyectando energía a la red o valores positivos indicando el uso de energía de la red. La Tabla 5 muestra la relación entre la generación del SFV y la demanda, describiendo la consecuencia implicada en la energía de la red.

**Figura 11.**

*Curvas de operación del SFV conectado a la red*



**Tabla 5.**

*Casos de operación del SFV conectado a la red*

<b>Núm.</b>	<b>Casos</b>	<b>Consecuencia</b>
1	La energía generada es superior a la demanda	La energía generada es utilizada en las cargas, el excedente es inyectado a la red de distribución
2	La demanda de energía es superior a la energía generada	La carga se alimenta desde el SFV y desde la red de distribución, para suplir el uso de energía
3	No hay demanda	El inversor utiliza la energía generada para inyectarla a la red de distribución
4	No hay generación FV	La red de distribución suministra la energía que requiere el tablero de distribución o el usuario

Nota. Tomado de (AUTOCONSUMO FOTOVOLTAICO CON BATERÍAS: DIFERENCIAS ENTRE INVERSORES HÍBRIDOS On-Grid Y INVERSORES CARGADORES Off-Grid - QKSOL - Energy Solutions, *n.d.*)

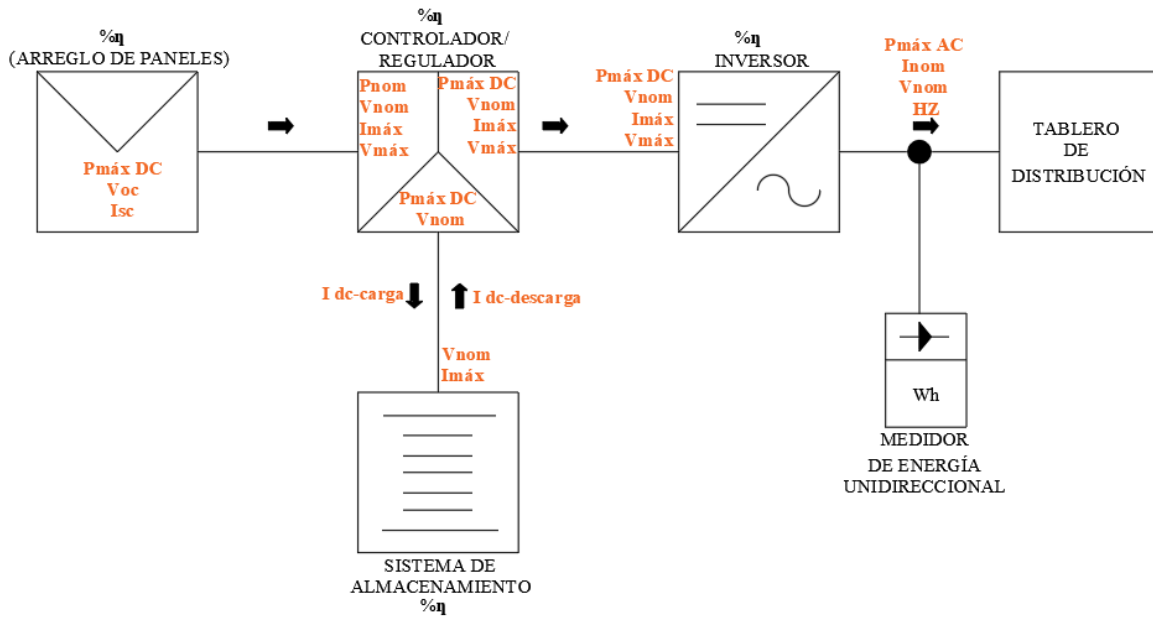
### **1.8.2 SFV aislado**

Como su nombre lo indica, estos SFV no están conectados a la red de distribución, por tanto, requieren de la instalación de un sistema de almacenamiento de energía (SA) que pueda satisfacer la demanda en aquellos momentos cuando no hay generación FV o es insuficiente. Además, es necesaria la instalación de un controlador/regulador que gestione la operación de los paneles FV y el SA.

La Figura 12, presenta el esquema de conexión del SFV aislado. El Capítulo 2 evidencia la selección del esquema como referencia.

Figura 12.

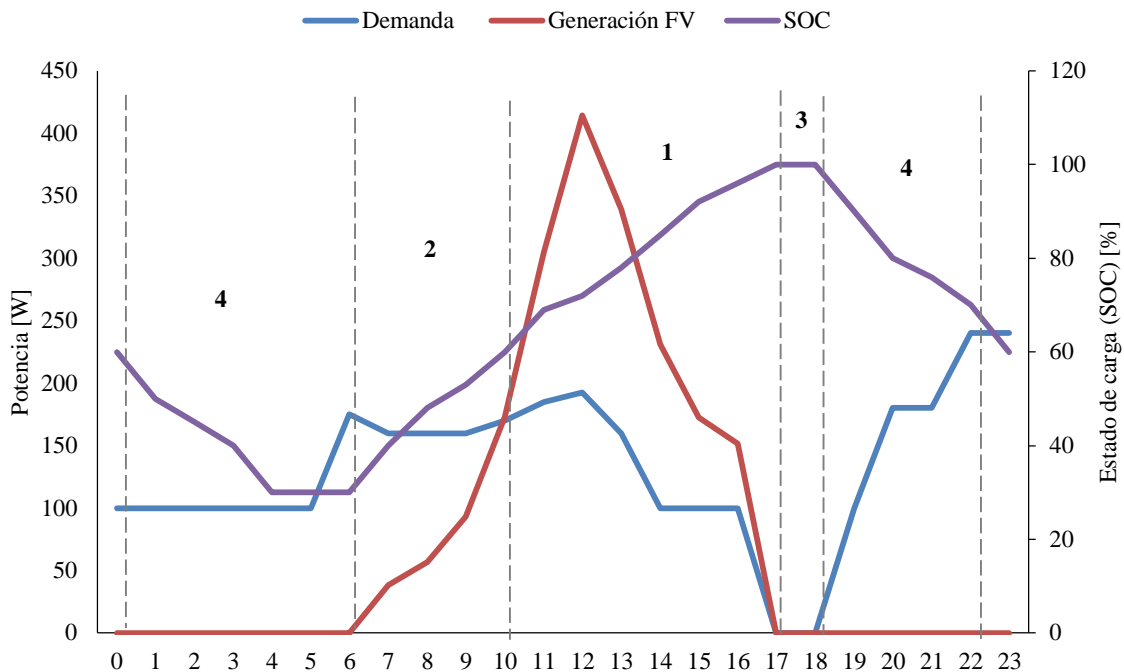
Esquema de conexión del SFV aislado (referencia).



La Figura 13 ilustra la relación entre la generación del SFV (curva naranja), la demanda energética (curva azul) y el estado de carga (SOC) del SA (curva amarilla). La Tabla 6 presenta la relación entre la generación del SFV y la demanda, describiendo la consecuencia implicada en el SA y la operación del SFV.

**Figura 13.**

*Curvas de operación del SFV aislado.*



**Tabla 6.**

*Casos de operación del SFV aislado*

Núm.	Casos	Consecuencia
1	La energía generada es superior a la demanda	El arreglo FV genera lo estrictamente necesario para satisfacer la demanda y cargar el SA
2	La demanda es superior a la energía generada	Las baterías suplen la diferencia de energía entre la carga y el SFV. Por tanto, la carga es sensible a desabastecimientos, dado el estado de carga de las baterías y el recurso solar
3	No hay demanda y el SA está completamente cargado	El suministro de energía eléctrica a la batería no es permitido por el controlador de carga. Por tanto, el arreglo FV cambia su modo de operación a circuito abierto
4	No hay generación FV	Se utiliza la energía del SA para alimentar totalmente la demanda hasta cuando sea posible ( $SOC_{\min}$ )

Nota. Tomado de: (AUTOCONSUMO FOTOVOLTAICO CON BATERÍAS: DIFERENCIAS ENTRE INVERSORES HÍBRIDOS On-Grid Y INVERSORES CARGADORES Off-Grid - QKSOL - Energy Solutions, *n.d.*)

## 1.9 Conceptos complementarios de los SFV

A continuación, se presentan consideraciones que no hacen parte de las etapas de dimensionamiento del SFV, pero se deben tener en cuenta, porque dan una idea general del rendimiento y operación del sistema.

### 1.9.1 Índice de rendimiento para SFV

El índice de rendimiento PR (*Performance Ratio*) es un indicador de calidad de operación del SFV en condiciones normales, abarca valores desde el inicio de la generación de energía solar (típicamente incorpora variables climatológicas en el arreglo FV), hasta el punto final (energía entregada por el SFV (variables eléctricas)), capturando el efecto general de las pérdidas del sistema al convertir energía solar, potencia DC y la salida del sistema en AC.

Este parámetro puede ser calculado por medio de la Eq. (1) (Estimación, n.d.). El PR es 0,7-0,85 para el SFV conectado a la red y 0,6-0,7 para el SFV aislado [10].

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

- PR: índice de rendimiento en un año (%).
  - $Y_f$ : producción específica durante un año (también llamado rendimiento final) expresado en [kWh/kWp] u horas sol pico [h].
  - $Y_r$ : rendimiento de referencia durante un año expresado en [kWh/kWp] u horas sol pico [h].
- El rendimiento de referencia representa la energía que se puede obtener en condiciones ideales, sin pérdidas, durante cierto periodo de tiempo. Es útil comparar el rendimiento de

referencia con el rendimiento final del sistema. El rendimiento de referencia se calcula por medio de la Eq. (2):

$$Y_{r(i)} = \frac{H_{POA(i)}}{G_{STC}} \quad (2)$$

Donde:

- $Y_{r(i)}$ : rendimiento de referencia para el periodo de tiempo  $i$  expresado en horas sol pico [h] o [kWh/kWp].
- $H_{PoA(i)}$ : la irradiación del plano del arreglo en el intervalo  $i$  [kWh/m<sup>2</sup>].
- $G_{STC}$ : la irradiancia de referencia en condiciones de prueba estándar (STC) [1000 W/m<sup>2</sup>].

### 1.9.2 Producción específica ( $Y_f$ )

Representa la cantidad de energía obtenida por cada unidad de potencia pico instalado. Se obtiene de dividir la producción total entre la potencia pico instalada, tal como lo evidencia la Eq. (3). La producción específica queda expresada en horas por lo que también recibe el nombre de horas equivalentes.

$$Y_f = \frac{E_p}{P_{Pico}} \quad (3)$$

Donde:

$E_p$ : energía neta producida por el SFV [kWh].

$P_{Pico}$ : potencia pico del arreglo FV [kWp].

Este parámetro suele aportar información más útil sobre la instalación que la producción en sí, porque indica la cantidad de energía generada anual por cada [kWp] instalado del SFV (Peña & Esteban, 2016).

### 1.9.3 Marco legal y regulatorio

La Ley 1715 de 2014 (Congreso de la República de Colombia, 2014) regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional, promoviendo el desarrollo y la utilización de este tipo de energías, integrándolas al mercado eléctrico nacional y promoviendo su participación en las ZNI (Congreso de la República de Colombia, 2014).

La Tabla 7 lista los decretos y resoluciones que permiten una justa participación en el sistema y mercado energético colombiano para las FNCE, garantizando la recuperación de la inversión sin poner en riesgo la estabilidad del Sistema Interconectado Nacional (SIN). El correcto conocimiento de resoluciones y decretos permiten incentivar la inversión en FNCE por parte de la persona natural o jurídica.

**Tabla 7.**

*Resoluciones y decretos vigentes en Colombia*

Referencia	Descripción
<b>Decreto 2469/2014</b> (Ministerio de Minas y Energía, 2014a)	Se establecen los lineamientos de política energética en materia de entrega de excedentes por autogeneración
<b>Decreto 2492/2014</b> (Ministerio de Minas y Energía, 2014b)	Se adoptan disposiciones en materia de implementación de mecanismos de respuesta a la demanda
<b>Resolución CREG 024/2015</b> (Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), 2015)	Se regula la actividad de autogeneración a gran escala en el SIN
<b>Resolución UPME 281/2015</b> (Unidad de Planeación Minero-Energética, 2015)	Se define el límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala
<b>Decreto 2143/2015</b> (Ministerio de Minas y Energía, 2015)	Se adicionan lineamientos para la aplicación de incentivos
<b>Resolución UPME 045/2016</b> (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2016)	Se establecen los procedimientos y requisitos para emitir la certificación y avalar los proyectos de FNCE, con miras a

	obtener el beneficio de exención del IVA y del gravamen arancelario
<b>Resolución CREG 030/2018</b> (Comisión de Regulación de Energía y Gas - CREG, 2018)	Se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el SIN
<b>Resolución CREG 038/2018</b> (Minas, 2014)	Se regulan las actividades de autogeneración en ZNI
<b>Decreto 829/2020</b> (DECRETO 829 de 2020, 2020)	Se reglamentan los beneficios establecidos en la Ley 1715 de 2014

## 2. Herramientas computacionales

Actualmente, existen diversas herramientas de cómputo para el dimensionamiento de los SFV utilizados en múltiples escenarios de generación de energía, siendo útiles para fines educativos, investigativos e influyendo en la toma de decisiones en proyectos que involucran los SFV en la industria.

Este capítulo describe la selección de las herramientas de cómputo usadas en el seminario de investigación. Además, se identifican sus características técnicas para el dimensionamiento de los SFV.

### 2.1 Selección de las herramientas de cómputo

Las herramientas de cómputo PVsyst y Solarius PV fueron seleccionados como primera opción debido a que la UIS dispone de licencias completas. Teniendo en cuenta la dificultad de adquirir nuevas licencias por parte de la UIS, fue necesario indagar por programas gratuitos y que

tuvieran características similares a las herramientas de cómputo ya escogidas, por tal motivo se eligió el software SAM.

El cuarto software fue seleccionado a partir de un proceso de revisión bibliográfica relacionada con dimensionamiento, análisis e implementación de SFV. La UIS cuenta con el acceso a la base de datos del IEEE (organización profesional técnica más grande del mundo dedicada al avance de la tecnología (IEEE, 1884)), por lo que fue el medio utilizado en la investigación. La Tabla 8 lista los cincuenta (50) documentos consultados con su respectivo programa y utilización.

**Tabla 8.**

*Documentos asociados a herramientas de cómputo para la simulación de los SFV*

Documento	Programa	Utilización
Sizing of a Photovoltaic LED Street Lighting System with PVsyst Software(Houria & M. Shabat, n.d.)	PVsyst	Propuesta para un dimensionamiento de un sistema de alumbrado público LED fotovoltaico
PV/Batteries sizing under multi criteria consideration(Fendri et al., 2017)	PVsyst	Comparación de los resultados de dimensionamiento con una herramienta alternativa basada en el consumo de energía y el perfil de cargas
Predict System Efficiency of 1 MWc Photovoltaic Power Plant Interconnected to the Distribution Network using PVSYST Software(Arif et al., 2015)	PVsyst	Dimensionamiento de una planta solar fotovoltaica, y comparación entre una estructura con inclinación fija y una estructura con inclinación estacional
Modeling and Simulation of 15 MW Grid-Connected Photovoltaic System using PVsyst Software(Soualmia & Chenni, 2017)	PVsyst	Análisis de la relación de rendimiento y las diferentes pérdidas de un SFV de 15 MW
Study of a photovoltaic system connected to the network and simulated by the code pvsyst(Meriem et al., 2014)	PVsyst	Cálculo del comportamiento de un SFV, observando parámetros de ubicación geográfica y orientación.
Comparative Study of Grid-Tied Photovoltaic (PV) System in Kathmandu and Berlin Using PVsyst(Karki et al., 2012)	PVsyst	Análisis comparativo de energía eléctrica que se puede inyectar a la red en 2 ciudades: Berlín y Katmandú
Comparative Performance Evaluation of Solar PV Modules from Different Manufacturers in India by using PVsyst(Saraswat & Sathans, 2017)	PVsyst	Evaluación comparativa del rendimiento de paneles solares tomando su base de datos
Solar PV System Design Using PVsyst: A Case Study OF AN Academic Institute(S. Sharma et al., 2018)	PVsyst	Diseño de un SFV para una institución académica
Comparative Analysis of Four Different Solar Photovoltaic Technologies(Kumar et al., 2015)	PVsyst	Comparación de cuatro tecnologías diferentes a partir de los parámetros de rendimiento
Techno-Economic Feasibility of Grid-Connected Photovoltaic Power Plant in Qeshm Island, Iran(Fazelpour et al., 2016)	PVsyst	Estudio de la viabilidad tecn-económica de una planta de energía solar FV
Energy Model Validation for Large-Scale Photovoltaic Systems(Westbrook & Collins, 2013)	PVsyst	Presentación de validaciones del modelo general y sus componentes

Estimation of Energy Production of Grid Connected Rooftop Solar Photovoltaic System at Nagar Nigam Kota, Rajasthan(Saxena & Gidwani, 2018)	PV <sub>sys</sub> t	Estimación de una planta de energía de 100 kWp.
Simulation Study of three PV Systems(Adar et al., n.d.)	PV <sub>sys</sub> t	Análisis del rendimiento de tres SFV conectados a la red bajo ciertas condiciones climáticas
Design of a Off-Grid 2 kW Solar PV System(Bouzguenda et al., 2014)	PV <sub>sys</sub> t	Diseño, simulación y análisis de un SFV aislado.
Analysis of a Grid Connected Solar Photovoltaic System with Different PV Technologies(Mathew & Hossain, 2018)	PV <sub>sys</sub> t	Simulación para evaluar y comparar el rendimiento de una planta de energía solar FV
Analysis Simulation of the Photovoltaic Output Performance(Irwanto et al., 2014)	PV <sub>sys</sub> t	Análisis de rendimiento de la potencia de salida FV.
Optimization and Evaluation of the Photovoltaic System in a Farm Studio Located in Ghardaia(Kaddour et al., 2018)	PV <sub>sys</sub> t	Diseño de un SFV aislado
Design and Simulation of Dependence of Manufacturing Technology and Tilt Orientation for 100 kWp Grid TiedSolar PV System at Jaipur(V. P. Sharma et al., 2016)	PV <sub>sys</sub> t	Diseño y simulación de un modelo de SFV de 100 kW
Design of Standalone Solar PV System Using MPPT Controller and Self-Cleaning Dual Axis Tracker(Ajgaonkar et al., 2019)	PV <sub>sys</sub> t	Diseño y simulación de un sistema solar FV aislado
Feasibility of establishing solar photovoltaic power plants at existing wind farms (Agrawal et al., 2018)	PV <sub>sys</sub> t	Cálculo del potencial solar de una zona
Study and Design of Hybrid PV-Generator-Wind System for Communal And Administrative Load in North Maluku, Indonesia(Yuliawan, 2018)	PV*SOL	Determinación de la precisión de la sombra cercana, pérdidas del módulo FV, pérdidas de la batería y el convertidor para una instalación FV
Grid connected solar PV system design and calculation by using PV*SOL premium simulation tool for campus hostels of RTU Kota(R. Sharma, 2017)	PV*SOL	Diseño de un SFV para la reducción del consumo de energía por parte de la red
Analysis and Optimization of a Geothermal, Biomass, Solar Hybrid System: An Application of PV*Sol Software(Patarau et al., 2015)	PV*SOL	Evaluación en el rendimiento de energía de un SFV
Design of The Solar Energy System in ITU Faculty of Electric and Electronics(Isik et al., 2015)	PV*SOL	Comparación con resultados analíticos para el conocimiento de la cantidad de energía que produce un SFV

Study and Simulation of Photovoltaic Installation Connected to the Grid with Storage System(Harzli et al., n.d.)	PV*SOL	Simulación de una instalación FV para tener una idea de la eficiencia y comparar los resultados con otro software
Design of building integrated photovoltaic system to the grid with power quality improvement features for Central African countries (Tidjani et al., 2014)	PV*SOL	Validación del análisis de viabilidad de un SFV, visualizando el balance energético con todas las pérdidas
Design of a Solar System Installation in Marrakesch using the Skelion Software Tool(Mari Soucase et al., 2017)	Skelion	Mostrar características del software y aplicarlo en el diseño de una planta FV
Performance Evaluation of Solar Tracking Systems for Power Generation Based on Simulation Analysis: Solar Island Concept(Safarini et al., 2017)	Skelion	Simulación de la potencia de salida del arreglo FV. También se utilizó PVsyst
Study of a Grid-Tied Photovoltaic System in Caruaru using PVsyst and Skelion(De Oliveira & De Aguiar Sodre, 2018)	PVsyst-Skelion	Obtener una predicción de generación de energía y pérdidas del SFV
Application of virtual reality tools in the teaching of concepts in projects of fast loading stations(Valdez et al., 2018)	Skelion	Simulación del arreglo FV con la mejor inclinación para obtener la energía necesaria para el estudio
Net Metering Benefits for Residential Buildings: A Case Study in Italy (Sajjad et al., 2015)	PVGIS	Estimación de generación fotovoltaica para un edificio residencial
Prediction and production of small PV power plant(Sanchez et al., 2017)	PVGIS	Obtener datos de irradiación, generación de energía e índice de rendimiento en un SFV de 500 Wp
Development of the Simplified Predictive Model for the Estimation of Annual PV Energy Production:A Case Study for Odisha(Tarai et al., 2017)	PVGIS	Estimación de la producción de energía anual de un SFV
Efficiency Analysis of Grid-connected Photovoltaic Power Plant(Markovic & Ciric, 2017)	PVGIS	Obtener el rendimiento del SFV, para ser comparado con los resultados de medición de energía y potencia del SFV
Design and Assesment of Solar Photovoltaic System For a Village of Rajasthan(Khandelwal & Shrivastava, 2017)	PVGIS	Estimación de la producción de energía mensual del SFV
Photovoltaic pump system design for small irrigation(Sobor, 2017)	PVGIS	Estimación de la radiación solar de la zona
Toward Green LIU campuses using PV systems(Yaghi et al., 2018)	HelioScope	Diseño del SFV, especificando parámetros mecánicos y componentes eléctricos
Improved Matlab Simulink Two-diode Model of PV Module and Method of Fast	Simulink	Diseñar y simular un módulo FV de dos diodos

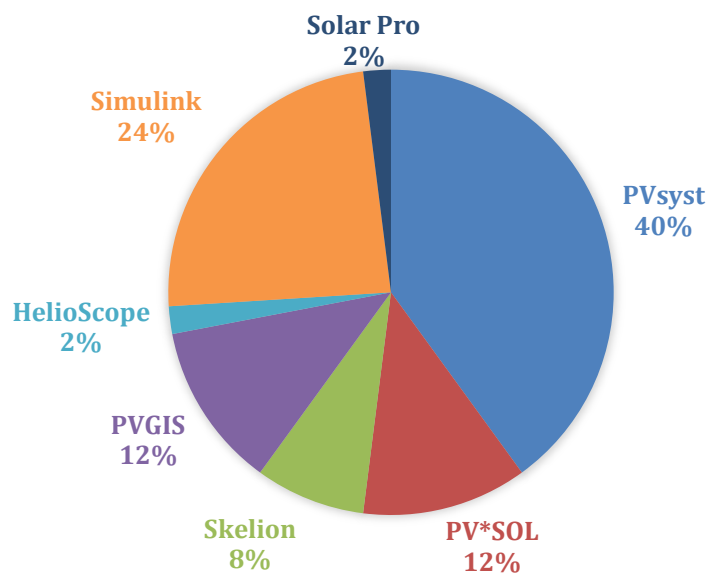
Large-Scale PV System Simulation(Le et al., n.d.)		
Modeling and simulation of photovoltaic hybrid energy systems optimization of sizing and control(Schmitt, 2002)	Simulink	Crear modelos matemáticos y componentes de SFV
A New Tool for Design Optimization and Cost Estimation of Stand-alone Photovoltaic Power Plants(Muoka et al., 2011)	Simulink	Dimensionamiento y simulación de parámetros y estimación de costos de SFV
The Photovoltaic Performance Modeling Collaborative (PVPMC)(Stein, 2012)	Simulink	Desarrollar una herramienta para modelado de SFV directamente en un sitio web
Modeling and performance analysis of a solar PV power system under irradiation and load variations(Tahiri et al., 2019)	Simulink	Modelado y simulación de SFV aislado, para analizar el rendimiento frente a variaciones de irradiación y cargas
Sizing and Simulation of an Energy Sufficient Stand-alone PV Pumping System(Said et al., 2017)	Simulink	Dimensionamiento y simulación de un sistema de bombeo fotovoltaico
Modeling and heuristic based optimal sizing of PV wind system(Sangeetha & Suja, 2017)	Simulink	Modelado de componentes para el sistema híbrido (eólico-fotovoltaico)
Design and simulation of Solar PV system(Dubey & Shah, 2017)	Simulink	Diseño y simulación de SFV
Simulation and Analysis of MPPT Algorithms for Solar PV based Charging Station(Nadkarni et al., 2018)	Simulink	Simulación y análisis de algoritmos de seguidores del punto de máxima potencia frente a variaciones de temperatura e irradiancia
Improved solar PV cell Matlab simulation model and comparison(Jiang et al., 2010)	Simulink	Modelado matemático de una celda fotovoltaica mejorada para ser comparada con una ya existente
Modeling & simulation of proposed 100 kW solar PV array power plant for MMMUT Gorakhpur(Jaiswal et al., 2016)	Simulink	Modelado y simulación de una planta solar conectada a la red
Simulation and analysis of stand-alone photovoltaic system with boost converter using MATLAB/Simulink(Simulink & Mohammed, 2014)	Simulink	Simulación y análisis de SFV, junto con simulación de curvas característica I-V y P-V, bajo diferentes temperaturas e irradiación
Simulation and performance analysis of 100kWp solar rooftop using Solar Pro-software(Thula et al., 2017)	SolarPro	Diseño y simulación de SFV para ser comparado con los datos actuales de medición de este

La Tabla 8 evidencia que PVsyst es utilizado para diferentes objetivos, por ejemplo, diseño y simulación de SFV, análisis del rendimiento del sistema, pérdidas por sombras cercanas, entre otros.

La Figura 14 representa el porcentaje de utilización de los programas en los cincuenta (50) documentos consultados. Se observa que PVsyst es el software más utilizado con una diferencia de 16% respecto a la segunda herramienta (Simulink).

**Figura 14.**

*Porcentaje de utilización de las herramientas consultadas.*



Simulink formalmente no es una herramienta de acceso libre en actividades de dimensionamiento o diseño y requiere de programación (conocimiento por parte del usuario). Por tal razón, se tomaron como primer criterio las características de PVsyst para la selección del software faltante.

A partir de esta información, se indagó por las características de las herramientas de cómputo identificadas. La Tabla 9 muestra las características de comparación.

**Tabla 9.**

*Comparación de las herramientas de cómputo encontradas en la base de datos del IEEE*

Características	PVsystem	Solar Pro	Skelion	PV*SOL	Helio Scope	Simulink	PVGIS
Diseño del SFV aislado	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓
Diseño del SFV conectado a la red	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Base de datos paneles FV, inversores y datos meteorológicos	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓
Aplicación 3D para simular sombras cercanas	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
Importación de datos radiación de PVGIS o NASA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Importación de datos del panel FV	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✗
Base de datos de baterías	✓	✗	✓	✓	✗	✗	✗
Importación de la demanda del usuario	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗

Según la Figura 14, Simulink es el programa que mayor porcentaje de uso presenta después de PVsyst, seguido de PVGIS y PV\*SOL con un mismo porcentaje de uso. Simulink y PVGIS no cumplen con algunas características de dimensionamiento como se observa en la Tabla 9, por tanto, son descartados para su implementación. PV\*SOL cumple con todos los criterios de dimensionamiento que impone PVsyst, en su versión de prueba permite el acceso a todas las características de la Tabla 9, por esta razón se incluye en el análisis objeto del seminario de investigación.

**2.2 Herramientas de cómputo seleccionadas**

La Tabla 10 muestra información general de las cuatro herramientas seleccionadas. Para el desarrollo del seminario se utilizó la versión de prueba de la herramienta PV\*SOL premium.

**Tabla 10.**

*Información general de las herramientas de cómputo seleccionadas*

Software	País	Desarrollador	Precio/año	Requerimientos del equipo	Licencia	Versión
PVsyst	Suiza	Universidad de Ginebra	638 USD	-Windows 8 o superior -1 GB de RAM -1 GB disco duro -Mínima resolución de pantalla 1280x720p -Tarjeta gráfica OpenGL 2.0 o mayor	Premium <i>Paga GISEL</i>	PVsyst 6.8.6
Solarius PV	Italia	ACCA SOFTWARE	108 EUR	-Windows 7 de 64bits o superior. -2 GB RAM (4 GB recomendado)	Completa <i>Gestionada por GISEL</i>	Solarius PV versión BIM 2(c)

				-Tarjeta gráfica compatible con OpenGL 3.0 o superior -Procesador Intel Core2 dúo 2,4 GHz o superior		
SAM	EE. UU.	NREL	GRATUITO	Windows 10/8 (64 bits) o superior	Completa y gratuita	SAM. 2020.2.29
PV*SOL premium	Alemania	Valentín Software	1460 USD	-Windows 7 o superior -RAM y disco duro varían dependiendo del tamaño del proyecto -Tarjeta gráfica compatible con DirectX	Completa	2020 (R8)

La Tabla 10 muestra que la mayoría de las herramientas de cómputo son elaboradas en el continente europeo, con desarrolladores de universidades y empresas. PV\*SOL es la herramienta de mayor precio.

PVsyst y Solarius PV fueron usados desde la sala del CENTIC con la licencia adquirida por la universidad, o desde la versión de prueba por un mes que fue instalada en el computador personal de cada integrante del seminario de investigación.

La Tabla 11 presenta las características principales de las herramientas de cómputo seleccionadas para el dimensionamiento de los SFV. Para SAM, se indica que esta herramienta obtiene los datos meteorológicos de NSRDB a diferencia de las otras herramientas que obtienen los datos de Meteonorm.

**Tabla 11.**

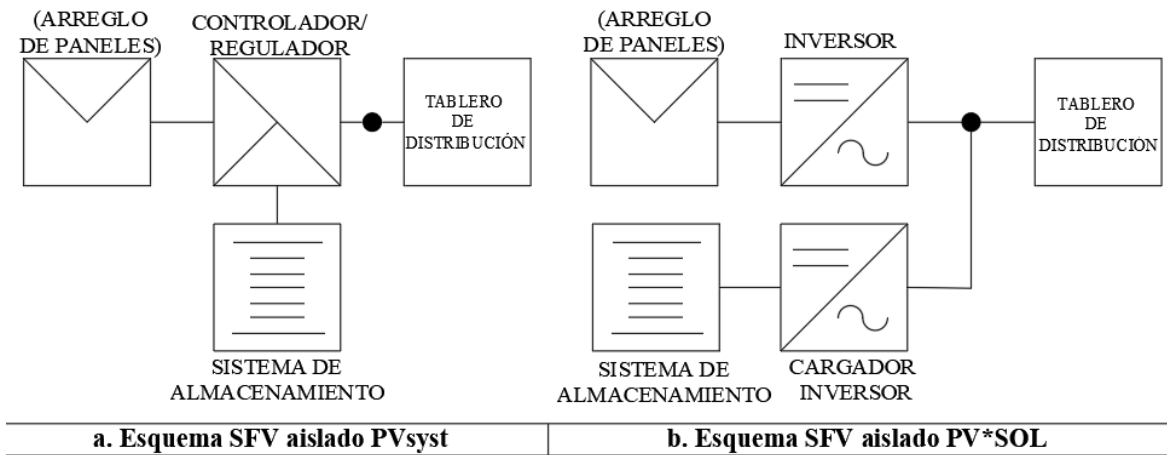
*Características principales de las herramientas de cómputo*

Características	PVsyst	Solaris PV	PV*SOL premium	SAM
Implementación del SFV aislado	✓	✗	✓	✗
Implementación del SFV conectado a la red	✓	✓	✓	✓
Base de datos de paneles FV, inversores	✓	✓	✓	✓
Aplicación 3D para simular sombras cercanas	✓	✓	✓	✓
Importación de datos meteorológicos de Meteonorm o NASA	✓	✓	✓	✗
Importación de datos de paneles FV	✓	✓	✓	✓
Base de datos controlador/regulador	✓	✗	✗	✗
Base de datos de baterías	✓	✓	✓	✗
Importación de la demanda del usuario	✓	✓	✓	✓

La Tabla 11 evidencia que Solaris PV y SAM no implementan el SFV aislado, pero Solaris PV cuenta con baterías en la base de datos y SAM permite dimensionar la capacidad del SA. La Figura 15 muestra los esquemas del SFV aislado implementados por PVsyst y PV\*SOL.

**Figura 15.**

*Tipos de conexión del SFV aislado. Fuente: Autores*



La Figura 15 evidencia que presentan disimilitud en los tipos de conexión del SFV aislado, implicando diferencias en la selección, configuración de equipos y en las consideraciones eléctricas (parámetros eléctricos, porcentajes de pérdidas) que se verían reflejados en los resultados de la simulación.

El esquema implementado por PV\*SOL conlleva a que la energía entregada por el arreglo de paneles FV pase primero por el proceso de conversión DC/AC y luego tenga una conversión AC/DC para cargar el SA. El esquema implementado por PVsyst indica que el controlador/regulador es el encargado de direccionar la energía entregada por el arreglo de paneles FV para cargar el SA o atender la demanda directamente, direccionándola hacia el inversor.

Formalmente, PVsyst no permite la selección del inversor ya que no cuenta con inversores off-grid en su base de datos, sin embargo, recomienda considerar su eficiencia en la demanda del usuario. En próximas versiones PVsyst integrará inversores off-grid (SA, n.d.) en su esquema. Por tal motivo, se eligió de referencia para SFV aislados (ver Figura 12).

El SFV conectado a la red es implementado en las cuatro herramientas de cómputo con el esquema mostrado en la Figura 10, el cual considera los equipos esenciales del SFV como el arreglo FV e inversor.

### **2.3 Disposiciones legales y regulatorias vigentes en Colombia**

La Resolución CREG 030 del 2018 regula los aspectos operativos y comerciales de AGPE y GD en el SIN, estableciendo las condiciones para la integración, conexión, medición y comercialización de energía para estos generadores. En términos energéticos de comercialización establece la energía inyectada a la red para GD. En AGPE establece los excedentes de energía como la exportación de energía eléctrica realizada, es decir, la energía que no se utilizó para satisfacer la demanda (autoconsumo) y se inyectó en la red. Se debe conocer la energía tomada de la red por el usuario con el fin de calcular la remuneración económica.

La Resolución CREG 038 de 2018 regula los aspectos operativos y comerciales para la integración de AGPE y GD en las ZNI, estableciendo el sistema de información para la administración de AGPE, las obligaciones de AGPE y GD relativas a la actividad de autogeneración, las condiciones y procedimientos para la conexión, las condiciones para la medición y comercialización de energía. Para términos energéticos de comercialización establece los mismos parámetros que la Resolución CREG 030 de 2018.

Las cuatro herramientas de cómputo cuentan con la posibilidad de cuantificar algunos conceptos que están en consonancia con las disposiciones regulatorias vigentes en Colombia ya mencionadas. La Tabla 12 muestra el cumplimiento de cada herramienta de cómputo.

**Tabla 12.**

*Consideraciones CREG 030/2018 y CREG 038/2018*

<b>Parámetro</b>	<b>PVsys</b>	<b>PV*SOL</b>	<b>Solarisus PV</b>	<b>SAM</b>
Energía inyectada a la red	✓	✓	✓	✓
Entrega de excedentes a la red	✓	✓	✓	✗
Energía de autoconsumo	✓	✓	✓	✗
Energía tomada de la red	✓	✓	✓	✓

Según los parámetros consignados en la Tabla 12, SAM solo considera GD, a diferencia de los demás programas que consideran GD y autogenerador.

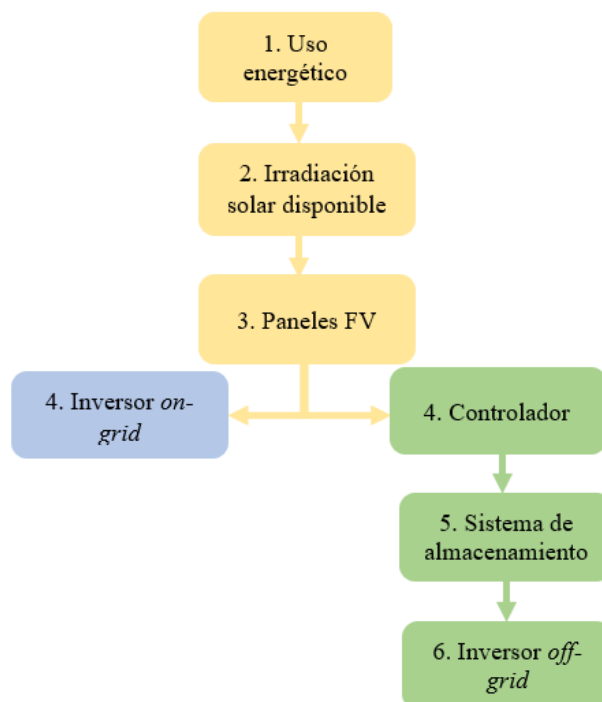
Las disposiciones legales presentadas en la Tabla 7 abarcan beneficios económicos (régimen de depreciación acelerada, exenciones de IVA y gravamen arancelario) y tributarios (deducciones sobre el impuesto a la renta) que son aplicados en las etapas de diseño y construcción del SFV, por lo tanto, no se tomaron en cuenta. El seminario de investigación abarca únicamente el dimensionamiento de los SFV.

### 3. Dimensionamiento de los cuatro SFV

Para el dimensionamiento de los SFV se siguen las etapas presentadas en la Figura 16, diferenciando el proceso de dimensionamiento del SFV aislado (verde) del conectado a la red (azul). Como se presentó en el Capítulo 1, ambos sistemas (naranja) tienen en común la estimación o forma de cálculo del uso energético, la irradiación solar disponible y el arreglo de paneles FV.

**Figura 16.**

*Etapas para dimensionar los SFV. Fuente: Autores*



**3.1 Proceso de dimensionamiento**

A continuación, se presentan los aspectos principales para cada etapa de dimensionamiento y se menciona cómo se pueden integrar a las herramientas de cómputo seleccionadas.

**3.1.1 Estimación del uso energético**

La Tabla 13 presenta algunas estrategias para estimar el comportamiento de las cargas en la instalación eléctrica. La norma técnica de la ESSA es una guía, ya que establece las curvas típicas de demanda diaria para diferentes tipos de servicios (comercial y residencial) y estrato socioeconómico para el departamento de Santander. Para otra región del país, se debe consultar la documentación disponible sobre la caracterización de la demanda de los usuarios.

**Tabla 13.**

*Estrategias de estimación de uso de energía*

Curva típica de demanda ESSA	Medición directa	Estimación por potencia y horas de uso
<p>Para conocer la curva de demanda en valores reales se toman deltas de tiempo de una hora, con el fin de facilitar los cálculos. La potencia base (<math>P_{base}</math>) se halla con la Eq. (4).</p> $P_{base} = \frac{\text{Uso energético diario}}{\sum_1^{24} \text{valores pu}} \quad (4)$ <p>Al obtener la <math>P_{base}</math> se procede a multiplicar por cada uno de los valores (pu) del día en la curva de demanda, obteniendo la demanda por hora y la curva en valores reales.</p>	<p>Se utiliza un medidor de energía para conocer el comportamiento de uso normal de cargas en un intervalo de tiempo deseado.</p> <p>Para establecer la curva de demanda diaria del usuario se mide la energía en un día.</p>	<p>Se siguen los siguientes pasos:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Realizar un inventario detallado de cargas, con su potencia nominal</li> <li>2. Identificar el intervalo de tiempo de utilización o uso del equipo en un día</li> </ol>

En esta etapa de dimensionamiento, las herramientas de cómputos permiten el ingreso de datos de energía de forma mensual [kWh/mes] o el uso de cargas en las 8760 horas de un año (365 días). PV\*SOL, PVsyst y Solarius PV permiten ingresar un estudio de cargas para establecer el perfil de demanda diario.

### ***3.1.2 Irradiación solar incidente***

En esta etapa es necesario la utilización de equipos de medida (piranómetro (Anagha et al., 2018)) o herramientas para obtener los datos meteorológicos; PVGIS, Meteonorm, la NASA y NSRDB son las utilizadas por PVsyst, PV\*SOL, Solarius PV y SAM. A través de las coordenadas geográficas o el nombre del sitio, cada herramienta de cómputo importa un conjunto de datos meteorológicos sintetizados para la simulación del SFV. La Tabla 14 muestra las herramientas que contienen la base de datos meteorológicas de cada software.

**Tabla 14.**

*Herramientas meteorológicas de cada software*

Herramienta	Datos entregados	Solaris PV	PV*SOL	SAM	PVsys
<b>PVGIS</b>	Irradiación horizontal (global y difusa), temperatura ambiente, velocidad del viento, humedad relativa	✓	✓	✗	✓
<b>Meteonorm</b>	Irradiación horizontal (global y difusa), temperatura ambiente, velocidad del viento, humedad relativa	✓	✓	✗	✓
<b>NASA</b>	Irradiación horizontal (global y difusa), temperatura ambiente	✗	✓	✗	✓
<b>NSRDB</b>	Irradiancia (directa, global y difusa), irradiancia en el plano receptor, velocidad del viento, humedad relativa	✗	✗	✓	✓

➤ Variables de entrada y salida de los SFV

La Tabla 15 describe las variables de entrada y salida de los SFV para las siguientes etapas del dimensionamiento.

Tabla 15.

Variables de entrada y salida de los SFV

Representación	Significado	Unidad	Fuente de información
<b>Variables de entrada</b>			
$G_{inc}$	Irradiancia incidente	W/m <sup>2</sup>	Herramientas meteorológicas, IDEAM o equipos de medición
$A_{panel}$	Área del panel FV	m <sup>2</sup>	Ficha técnica del panel FV
$n_{panel}$	Eficiencia del panel FV	%	Ficha técnica del panel FV
$T_{amb}$	Temperatura ambiente	°C	Ficha técnica del panel FV
$NOTC$	Temperatura normal de operación de la célula FV por sus siglas en inglés	°C	Ficha técnica del panel FV
$\beta$	Coefficiente de temperatura	%/°C	Ficha técnica del panel FV
<b>Uso energético</b>	Demanda de energía	Wh	Usuario
$P_{nom_{panel\ FV}}$	Potencia nominal del panel FV	W	Ficha técnica del panel FV
$P_{nom_{inversor}}$	Potencia nominal del inversor	W	Ficha técnica del inversor
$V_{m\acute{a}x_{inversor}}$	Tensión máxima de entrada del inversor	V	Ficha técnica del inversor
$V_{oc_{panel\ FV}}$	Tensión de circuito abierto del panel FV	V	Ficha técnica del panel FV
$I_{sc_{panel\ FV}}$	Corriente de corto circuito del panel FV	A	Ficha técnica del panel FV
$n_{inv}$	Eficiencia del inversor	%	Ficha técnica del inversor
$n_{reg}$	Eficiencia del controlador/regulador	%	Ficha técnica del controlador/regulador
$n_{batc}$	Eficiencia de carga de la batería	%	Ficha técnica de la batería
$n_{batd}$	Eficiencia de descarga de la batería	%	Ficha técnica de la batería
$Cap_{bat}$	Capacidad energética de la batería	Ah	Ficha técnica de la batería
$SOC_{mín}$	Estado de carga mínimo admisible por la batería	%	Ficha técnica de la batería
<b>Variables de salida</b>			
$P_{fv}$	Potencia entregada por el panel FV	W	Eq. (5)
$T_{oper}$	Temperatura de operación del panel FV	°C	Eq. (6)
$P'_{fv}$	Potencia corregida por efectos de temperatura	W	Eq. (7)
$E_{fv}$	Energía entregada por el panel FV	Wh	Eq. (8)

<b>CI</b>	Capacidad instalada del arreglo FV	Wp	Eq. (10)
<b>n<sub>sist</sub></b>	Eficiencia del SFV aislado	%	Eq. (14)

### 3.1.3 Paneles FV

A continuación, se presenta el procedimiento para calcular la energía generada por el panel FV. Lo primero a conocer es la cantidad de potencia que puede entregar un panel FV. Esta potencia se puede calcular por la Eq. (5) (Molina & Martinez, 2017).

$$P_{fv} = G_{inc} * A_{panel} * n_{panel} \tag{5}$$

La temperatura de operación es un parámetro que afecta directamente la generación del panel FV, el cual puede ser estimado a partir de la Eq. (6) (González, 2012) para un intervalo de tiempo definido por la temperatura ambiente e irradiancia incidente. Se aclara que existen en la literatura otros modelos matemáticos para estimar esta afectación.

$$T_{oper} = T_{amb} + G_{inc} * \left( \frac{NOTC - 20}{800} \right) \tag{6}$$

La Eq. (7) permite estimar la potencia entregada por un panel FV teniendo en cuenta las afectaciones por temperatura. Se aclara que también existen otros aspectos que afectan la generación como el sombreado, suciedad, entre otros.

$$P'_{fv} = P_{fv} * (1 + \beta * (T_{oper} - 25)) \tag{7}$$

La cantidad de energía generada ( $E_{fv}$ ) por el panel FV puede ser estimada a partir de la Eq. (8). Se realiza el cálculo con un intervalo igual al utilizado en la Eq. (6). Normalmente estos intervalos son horarios.

$$E_{fv} = \sum P'_{fv} \tag{8}$$

**3.1.4 SFV conectado a la red**

Se presentan las consideraciones para el dimensionamiento del SFV conectado a la red, donde el inversor es el componente que determina la eficiencia del sistema ( $n_{inv}$ ). El número de paneles FV se obtiene por medio de la Eq. (9) (Claudia, 2017) . El uso energético debe tener el mismo intervalo de tiempo de la energía generada por el panel FV (Eq. (6)).

$$\#Paneles = \frac{Uso\ energético}{E_{fv} * n_{inv}} \tag{9}$$

En las cuatro herramientas de cómputo es posible ingresar la CI deseada del arreglo FV e inmediatamente determinan la cantidad de paneles FV necesarios en el SFV. Además, es posible la configuración de pérdidas por temperatura, sombreado (diseño 3D) entre otras. Las herramientas cuentan con un espacio 3D para considerar objetos cercanos que generan sombra sobre el arreglo FV. La Tabla 16 muestra las opciones que tienen los programas para definir la CI del sistema.

**Tabla 16.**

*Opciones para definir la CI del SFV*

Opciones	Solaris PV	PV*SOL	SAM	PVsyst
Área disponible	✗	✗	✗	✓
CI deseada	✓	✓	✓	✓
Porcentaje de demanda que se desea satisfacer	✓	✓	✗	✗
Irradiación promedio mensual específica	✗	✓	✗	✗

➤ Cantidad de inversores

Primero se necesita conocer la potencia máxima a la que deben operar los inversores; teniendo en cuenta la cantidad de paneles FV a utilizar se tiene la Eq. (10).

$$CI = Pnom_{panel\ FV} * \#paneles\ FV \tag{10}$$

A partir de la Eq. (11) se determina la cantidad de inversores.

$$\# \text{ Inversores} = \frac{CI}{P_{nom_{inversor}}} \quad (11)$$

Es necesario que la tensión (sumatoria de  $V_{oc_{panel\ FV}}$  en serie) y corriente (sumatoria de  $I_{sc_{panel\ FV}}$  en paralelo) del arreglo FV esté dentro del rango de operación del inversor. Además, que la frecuencia del inversor sea igual a la frecuencia de la red de distribución. Aplicando las ecuaciones (12) y (13) (González, 2012) se define la configuración de los paneles FV para la conexión al inversor.

$$\# \text{ Paneles en serie} = \frac{V_{máx_{inversor}}}{V_{oc_{panel\ FV}}} \quad (12)$$

$$\# \text{ Ramas en paralelo} = \frac{\# \text{ Total de paneles}}{\# \text{ Paneles en serie}} \quad (13)$$

Con la conexión panel-inversor se busca tener el mayor aprovechamiento de potencia en ambos equipos, sin sobrepasar los límites de tensión y corriente especificados por el fabricante. Los programas PVsyst, PV\*SOL y Solarius PV cuentan con un componente “ayuda de dimensionamiento”, en donde se muestran consideraciones e indicaciones acerca de la selección de los equipos y de sus conexiones.

Por ejemplo, PVsyst indica si la potencia de entrada del inversor es mayor o menor que la del arreglo FV, PV\*SOL preselecciona los posibles inversores a utilizar y Solarius PV predetermina la conexión entre el arreglo FV e inversor.

### 3.1.5 SFV aislados

El dimensionamiento de los SFV aislados difieren de los conectados a la red por la cantidad de equipos y su modo de funcionamiento. En este tipo de sistemas la eficiencia está dada por la Eq. (14).

$$n_{sist} = n_{inv} * \frac{n_{reg} + n_{reg}^2}{2} * n_{batc} * n_{batd} \quad (14)$$

Esta eficiencia es importante para determinar el número de paneles FV, ya que la energía del arreglo FV debe satisfacer la demanda, cargar el SA y suplir las pérdidas en los diferentes equipos. El número de paneles FV se determina a partir de la Eq. (15)

$$\#Paneles_{sfv \text{ aislado}} = \frac{Uso \text{ energético}}{E_{fv} * n_{sist}} \quad (15)$$

#### ➤ Controlador/ regulador

El controlador se caracteriza porque a él se conectan el arreglo FV, el SA y el inversor. Para conocer la cantidad de controladores a utilizar se hace de forma similar como se calcula la cantidad de inversores en el SFV conectado a la red (Eq. (11)).

Para conectar el controlador/regulador al SA se deben cumplir los límites de tensión de cada equipo y corriente máxima del controlador/regulador. Generalmente los controladores trabajan a 12, 24 y 48 V. Por último, para conectar el controlador/regulador con el inversor se aplican los límites de tensión y corriente especificados por el fabricante.

PVsyst es el único software que cuenta con controladores/reguladores en su base de datos. Además, ajusta automáticamente un “controlador/regulador universal” al sistema o permite seleccionarlo. PV\*SOL cuenta con un esquema de cargador/inversor mostrado en la Figura 15. Solarius PV y SAM solo tienen integrado inversores.

#### ➤ Sistema de almacenamiento

Por medio de la Eq. (16) (Llano & Monta, 2016) se dimensiona el SA.

$$\#baterías = \frac{Uso\ energético * \#número\ de\ días}{Cap_{bat} * (1 - SOC_{mín}) * n_{inv} * n_{reg} * n_{batd}} \quad (16)$$

Las baterías deben ser configuradas en un arreglo serie-paralelo para que cumplan las condiciones de tensión y corriente especificadas por el fabricante del controlador/regulador. La Tabla 17 presenta las posibles formas de dimensionar el SA en cada software.

**Tabla 17.**

*Formas de dimensionar el SA*

<b>Solaris PV</b>	<b>PV*SOL</b>	<b>SAM</b>	<b>PVsyst</b>
Ingresar capacidad (mín y máx) y SOC mínimo	Ingresar tipo y cantidad de baterías	Ingresar el tipo de tecnología, capacidad y SOC (mín y máx)	Ingresar días de autonomía y tipo de batería

### 3.2 Información de los SFV a dimensionar

Para el dimensionamiento de los cuatro SFV se utilizó el panel FV Canadian Solar CS3W 400P. La Tabla 18 presenta los principales parámetros y características bajo condiciones estándar de medida (STC por sus siglas en inglés) (High et al., 2001). Los demás equipos utilizados en el dimensionamiento varían en cada software según la disponibilidad.

**Tabla 18.**

*Características principales del panel FV*

<b>Canadian Solar CS3W 400P</b>	
Potencia máxima nominal (P <sub>máx</sub> )	<b>400 W</b>
Voltaje de operación óptima (V <sub>mp</sub> )	<b>38,7 V</b>
Corriente de operación óptima (I <sub>mp</sub> )	<b>10,3 A</b>
Voltaje de circuito abierto (V <sub>oc</sub> )	<b>47,2 V</b>
Corriente de corto circuito (I <sub>sc</sub> )	<b>10,9 A</b>
Eficiencia	<b>18,11 %</b>
Área	<b>2,21 m<sup>2</sup></b>

Se dimensionaron cuatro SFV (dos aislados y dos conectados a la red) con características diferentes de uso de energía eléctrica (uno residencial y uno comercial). Las cuatro localidades están ubicadas en el departamento de Santander. La Tabla 19 muestra las principales características de las localidades.

**Tabla 19.**

*Características de las localidades de los cuatro casos de estudio*

	SFV conectados a la red		SFV aislados	
Nombre	Vivienda unifamiliar	UIS	Finca agropecuaria	Finca residencial
Ubicación	Bucaramanga	Bucaramanga	Barichara	Piedecuesta
Objeto	Residencia familiar	Entidad educativa (comercial)	Vivienda, crianza de peces y cabros (comercial)	Vivienda y una pequeña producción de licor de mandarina
Superficie disponible	56 m <sup>2</sup>	9678,57 m <sup>2</sup>	Lo que requiera la instalación	Lo que requiera la instalación
Uso promedio (2019)	147 kWh/mes	666,82 MWh/mes(Planta Física de la UIS, 2019)	125,53 kWh/día(Finca Agropecuaria, 2019)	4 kWh/día
Finalidad del SFV	Se pretende satisfacer 100% de la demanda	Se pretende satisfacer 30% de la de demanda	Se pretende satisfacer 100% de la demanda	Se pretende satisfacer 100% de la demanda

En el caso del SFV UIS, el porcentaje de demanda fue específico debido a que la superficie disponible en el campus central es limitada (Camargo Carvajal & Dallos Castellanos, 2011).

Las tablas 20 y 21 presentan los resultados de dimensionamiento en las cuatro herramientas de cómputo, los cuales serán complementados con la información del Capítulo 4 para su posterior comparación y análisis. Para presentar las tablas 20, 21 y 22, los nombres de los programas se representan con siglas de la siguiente forma: PV\*SOL (PL); SAM (SM); PVsyst (PS); Solarius PV (SP).

**Tabla 20.**

*Resultados de dimensionamiento del SFV conectado a la red*

SFV conectado a la red								
Nombre	Vivienda unifamiliar				UIS (Universidad Industrial de Santander)			
Programa	SP	PL	SM	PS	SP	PL	SM	PS
# paneles FV	3				4377	4377	4380	4374
Superficie de paneles FV [m <sup>2</sup> ]	6,63	6,63	6,6	6,62	9668,8	9669,6	9636	9663
CI del arreglo FV	1,2 kW				1,75 MW			
# inversores	1				3	25	19	15
Potencia nominal DC por inversor	1,3 kW	1,5 kW	1,6 kW	1,4 kW	550 kW	77 kW	96 kW	120 kW
Demanda anual (2019)	1,76 MWh				8 GWh			
Desempeño energético (año)	1,56 MWh	1,76 MWh	1,70 MWh	1,68 MWh	2,28 GWh	2,62 GWh	2,52 GWh	2,56 GWh

**Tabla 21.**

*Resultados de dimensionamiento del SFV aislado*

SFV aislado								
Nombre	Finca residencial				Finca agropecuaria			
Programa	SP	PL	SM	PS	SP	PL	SM	PS
# paneles FV	3				83	77	72	120
Superficie de paneles FV [m <sup>2</sup> ]	6,63	6,63	6,6	6,62	183,35	218,79	154,1	265
CI del arreglo FV	1,2 kW				33,2 kW	30,8 kW	28,81 kW	48 kW
# inversores	1	1	1	-	1	1	1	-
Potencia nominal DC por inversor	1,28 kW	1,5 kW	1,61 kW	-	33 kW	36 kW	40,64 kW	-
# baterías	20	2	-	8	116	66	-	64
Capacidad de cada batería	33 Ah	100 Ah	-	200 Ah	1,75 kAh	100Ah	-	180 Ah
# controlador/regulador	-	1	-	1	-	3	-	1
Demanda anual (2019)	1,46 MWh				45,31 MWh			
Desempeño energético (año)	1,59 MWh	1,58 MWh	1,78 MWh	1,5 MWh	45,09 MWh	44,8 MWh	50,65 MWh	47,83 MWh

### 3.3 Comparación de las características de las herramientas de cómputo

La comparación es el proceso de identificar variables para establecer relaciones, diferencias o semejanzas, lo que permite encontrar ventajas y desventajas para emitir un juicio de valor.

Durante el proceso de aprendizaje y selección de las herramientas, se reconocieron características para el dimensionamiento de los SFV. La Tabla 22 lista los 37 ítems definidos en los criterios de comparación (el Anexo B presenta a detalle el cumplimiento), los cuales están divididos en tres tópicos generales:

#### A. Datos básicos

- B. Dimensionamiento y selección de equipos
- C. Simulación e informes

**Tabla 22.**

*Cumplimiento de cada ítem de comparación*

Criterios		SP	PL	SM	PS
<b>Información meteorológica</b>					
A1	Permitir la ubicación en cualquier parte del globo terráqueo	✓	✓	✓	✓
A2	Tener una base de datos mínima de 10 años	✓	✓	✓	✓
A3	Incluir parámetros mínimos: irradiación y temperatura	✓	✓	✓	✓
<b>Información general</b>					
A4	Información detallada del cliente	✓	✓	✗	✗
A5	Información detallada del proyectista	✓	✓	✗	✗
A6	Información detallada de la instalación	✓	✓	✗	✗
<b>Información del perfil de carga</b>					
A7	Configurar el perfil por horas, mes y año	✓	✓	✓	✓
A8	Permitir el ingreso por estudio de cargas	✓	✓	✗	✓
A9	Permitir el ingreso a partir de importación de perfiles	✓	✓	✗	✗
<b>Base de datos de equipos</b>					
B10	Permitir el ingreso de equipos que no estén en la base de datos	✓	✓	✓	✓
B11	Actualizar la base de datos por los fabricantes	✓	✓	✗	✓
B12	Separar los equipos del SFV aislado del conectado a la red (inversores)	✗	✗	✗	✓
B12	Integración de controladores/reguladores (esquema de referencia Figura 12)	✗	✗	✗	✓
<b>Ayudas en el dimensionamiento</b>					
B14	Definir el tamaño del arreglo a partir de: uso energético, irradiación promedio anual o mensual, el peor valor de irradiación mensual durante el año y porcentaje de la demanda que debe satisfacer	✓	✓	✗	✗
B15	Presentar el arreglo FV durante el dimensionamiento (escrito o gráfico)	✓	✓	✓	✓
B16	Presentar el diagnóstico durante la selección de equipos (filtro de equipos preseleccionados por el software)	✗	✓	✗	✗
B17	Revisar la compatibilidad de conexión eléctrica entre los equipos	✓	✓	✗	✓
B18	Presentar las características eléctricas y físicas de los equipos dentro de la base de datos del software	✓	✓	✓	✓
B19	Configurar los días de autonomía y baterías a utilizar	✓	✓	✗	✓

B20	Ayudas audiovisuales y foros de preguntas por parte del desarrollador	✓	✓	✗	✓
<b>Diseño 3D</b>					
B21	Importar planos y archivos de estructuras diseñadas	✓	✓	✓	✓
B22	Presentar de forma opcional el diseño 3D para el dimensionamiento	✗	✓	✓	✓
B23	Calcular pérdidas por sombreado a partir de fotos	✓	✗	✗	✗
B24	Insertar volumetrías definidas por el software para el cálculo de sombreado	✓	✓	✓	✓
<b>Diagnóstico pre-informe</b>					
B25	Entregar gráficas horarias	✓	✓	✗	✓
B26	Entregar gráficas mensuales	✓	✓	✓	✓
B27	Presentar el índice de rendimiento de la instalación	✗	✓	✓	✓
B28	Entregar el valor de la energía inyectada a la red y de autoconsumo	✓	✓	✗	✓
B29	Entregar el valor de la energía faltante en el SFV aislado	✗	✓	✗	✓
<b>Tiempo de simulación</b>					
C30	Simular un periodo mínimo de un año	✓	✓	✓	✓
C31	Realizar la simulación con valores horarios	✓	✓	✓	✓
C32	Entregar el “presupuesto” del proyecto	✓	✓	✓	✓
<b>Informes entregados por cada software</b>					
C33	Entregar el diagrama general de pérdidas de energía	✗	✗	✓	✓
C34	Entregar el valor de energía generada por el SFV	✓	✓	✓	✓
C35	Entregar los datos técnicos del SFV (capacidad instalada, PR, energía generada, etc.)	✓	✓	✓	✓
C36	Entregar los datos generales del SFV (geográficos y meteorológicos)	✓	✗	✗	✗
C37	Entregar los criterios de verificación de la conexión entre equipos	✓	✗	✗	✗

La Tabla 23 reúne los criterios establecidos en cada tópico, con el fin de totalizar el cumplimiento de estos en cada software y emitir un juicio de valor.

**Tabla 23.**

*Cantidad de criterios cumplidos por cada software*

Criterios cumplidos	Solaris PV	PV*SOL	SAM	PVsyst
✓	30	31	18	28
✗	7	6	19	9

La Tabla 24 presenta un símbolo e indicador de valor para complementar la comparación y detallar algunas ventajas. Asimismo, la Tabla 25 enfatiza en su valor y apreciación entre las cuatro herramientas.

**Tabla 24.**

*Símbolo e indicador de valor*

✓✓	✓	✗
Cumplimiento completo y distintivo	Cumplimiento básico o promedio	No cumple la característica presentada

**Tabla 25.**

*Características de comparación de las funcionalidades*

Características		Solaris PV	PV*SOL	SAM	PVsyst
1	Dimensionar SFV conectados a la red	✓✓	✓✓	✓	✓✓
2	Dimensionar SFV aislados	✗	✓	✗	✓✓
3	Separar los componentes del SFV conectado a la red del aislado	✓✓	✓	✗	✓✓
4	Generar tablas y gráficas específicas (horarias, diarias, mensuales y anuales)	✓	✓	✓	✓✓
5	Diagnóstico durante el proceso de dimensionamiento	✓✓	✓	✗	✓✓
6	Presentar soluciones a errores de dimensionamiento	✓✓	✓	✗	✓
7	Barra de herramientas secuencial y explicativa	✓	✓✓	✓	✓
8	Interfaz actual y llamativa	✓✓	✓✓	✓	✗
9	Variedad de perfiles de carga prediseñados	✓✓	✓✓	✗	✓
10	Realizar simulación por minutos sintetizados	✓	✓	✗	✓
11	Importar y abrir archivos existentes	✓✓	✓✓	✓✓	✓

12	Contar con herramienta de diseño 3D	✓✓	✓	✓	✓
13	Utilización del software sin conexión a internet	✓	✗	✗	✓
14	Mostrar distribución de energía entre el usuario y la red	✓	✓	✓	✓✓
15	Integración de controladores/reguladores (esquema de referencia Figura 12)	✗	✗	✗	✓
16	Acceso a capacitación y tutoriales por parte del desarrollador	✓✓	✓✓	✗	✓

➤ PV\*SOL cumple con la mayoría de los criterios establecidos, contando con características similares a PVsyst. Sin embargo, no cuenta con el esquema de referencia para SFV aislado y necesita de conexión a internet para su funcionamiento.

➤ Solarius PV es el software con la mejor herramienta de diseño 3D y es el único que presenta posibles soluciones a los problemas identificados en la selección y conexión de los equipos, cabe aclarar que no dimensiona SFV aislados.

➤ SAM es un software que cuenta con una base datos de equipos e información meteorológica confiable (*Sandia National Laboratories, California Energy Commission y NREL*), pero es el menos recomendable porque cumple con la menor cantidad de criterios y es poco didáctico al momento de dimensionar el sistema, cabe resaltar que no implementa SFV aislados.

➤ PVsyst presenta ayudas durante el proceso de dimensionamiento, permite crear nuevas tablas y gráficas para el análisis de resultados, es el único que cuenta con controlador/regulador en su base de datos. Sin embargo, presenta una interfaz poco llamativa y no permite dimensionar el arreglo FV a partir de la demanda.

#### **4. Análisis de operación**

El análisis de operación involucra la identificación de todos los elementos que componen el SFV y determinar si su funcionamiento es el esperado o presenta fallas.

Para el dimensionamiento de cada caso se utilizó el mismo perfil de demanda diaria para los programas PV\*SOL, Solarius PV y PVsyst. El software SAM no permite el ingreso del perfil de demanda diaria, por tal motivo se utilizaron valores mensuales.

##### **4.1 SFV conectado a la red de la vivienda unifamiliar**

La Tabla 26 presenta los resultados del dimensionamiento de la vivienda unifamiliar para un año.

**Tabla 26.**

*Dimensionamiento del SFV (vivienda unifamiliar)*

<b>Parámetro</b>	<b>Solaris PV</b>	<b>PV*SOL</b>	<b>SAM</b>	<b>PVsyst</b>
Irradiación solar [MWh/m <sup>2</sup> ]	1,73	1,73	1,86	1,73
Desempeño energético [MWh]	1,56	1,76	1,70	1,68
Producción específica [MWh/kWp]	1,31	1,46	1,43	1,40
Índice de rendimiento (PR) [%]	75,48	84,70	76	80,33
Energía inyectada a la red [MWh]	0,86	1,09	1,70	1,02
Energía para autoconsumo [kWh]	712,76	669,20	-	663,63
Energía tomada de la red [MWh]	1,05	1,09	1,76	1,10
Energía inyectada a la red [%]	54,51	62,02	-	60,53
Energía para autoconsumo [%]	45,49	37,98	-	39,47

La Tabla 26 evidencia que PV\*SOL, PVsyst y Solaris PV cuentan con el mismo valor de irradiación anual debido a que utilizan Meteonorm para obtener los datos meteorológicos. Sin embargo, presentan variaciones en los resultados debido a las pérdidas predefinidas de cada software (ver Anexo C) y la eficiencia de los equipos utilizados.

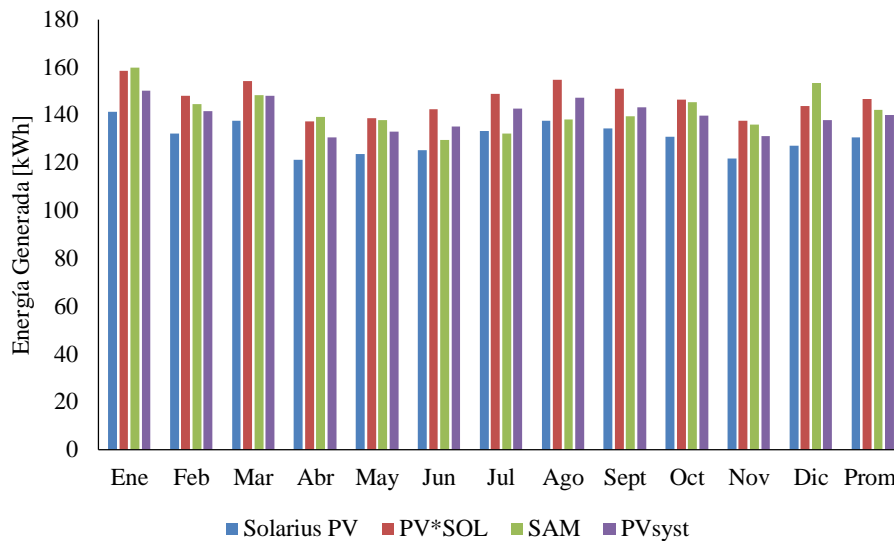
PV\*SOL simula el mejor desempeño energético para el SFV, evidenciado en su producción específica y PR. SAM es el software que mayor irradiación presenta, pero el desempeño energético no es el mayor, esto se ve reflejado en el PR.

Solaris PV tiene el mejor desempeño en cuestión de autoconsumo destinando el 45,49%, siendo el mayor entre los tres. Lo ideal es que la mayor cantidad posible de energía generada por el SFV se destine a autoconsumo, ya que se aprovecha al máximo el SFV y se disminuyen las pérdidas en los conductores.

PV\*SOL fue el único de las cuatro herramientas que simuló un desempeño capaz de satisfacer el 100% de la demanda establecida, aun cuando los SFV tiene la misma CI. La Figura 17 presenta los resultados de desempeño energético por mes.

**Figura 17.**

*Desempeño mensual del SFV (vivienda unifamiliar)*



La Figura 17 muestra una variación de las herramientas en cuestión de desempeño cada mes. PV\*SOL y SAM simulan un desempeño similar para los primeros meses del año, pero entre junio y agosto SAM cae notoriamente respecto al de PV\*SOL. La Tabla 26 evidenció este comportamiento.

Solarius PV tuvo el menor desempeño anual aun cuando presenta la misma CI que las demás herramientas, esto se ve evidenciado en su producción específica (menor entre los cuatro). La Tabla 27 presenta los excedentes de energía y el autoconsumo mes a mes simulados, estos valores son representados en la Figura 18.

**Tabla 27.**

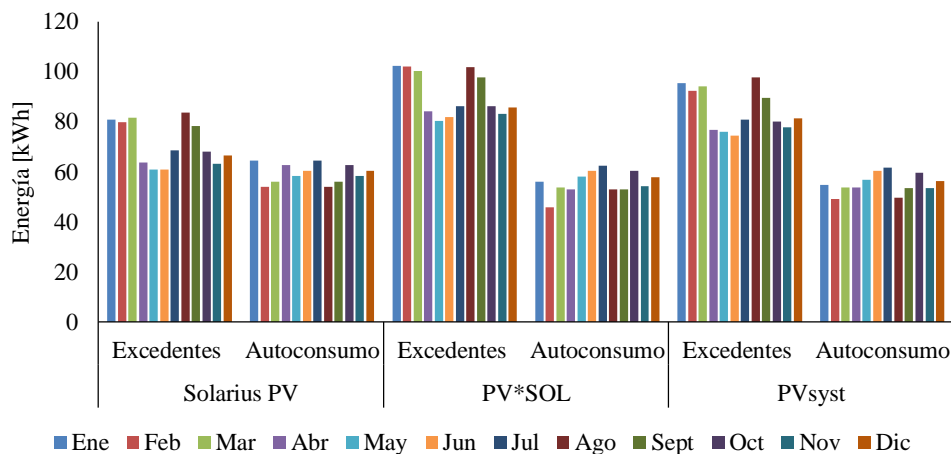
*Excedentes y autoconsumo del SFV (vivienda unifamiliar)*

Mes	Solarius PV [kWh]		PV*SOL [kWh]		PVsyst [kWh]	
	Excedentes	Autoconsumo	Excedentes	Autoconsumo	Excedentes	Autoconsumo
Ene	81,06	64,64	102,40	56	95,52	54,74
Feb	79,87	53,97	102,10	46	92,43	49,23

Mar	81,62	56,14	100,30	53,90	94,22	53,87
Abr	63,77	62,75	84,30	53,10	76,85	53,77
May	61,07	58,45	80,40	58,30	76,07	56,91
Jun	60,99	60,43	81,90	60,60	74,60	60,60
Jul	68,66	64,64	86,40	62,60	81,05	61,77
Ago	83,67	53,97	101,80	53	97,72	49,69
Sept	78,26	56,14	97,90	53,10	89,75	53,58
Oct	68,07	62,75	86,20	60,40	80,10	59,67
Nov	63,34	58,45	83,20	54,40	77,80	53,49
Dic	66,67	60,43	85,90	57,80	81,48	56,31
Total	857,05	712,76	1092,80	669,2	1017,59	663,63

**Figura 18.**

*Excedentes y autoconsumo del SFV (vivienda unifamiliar)*



La Figura 18 presenta la tendencia que tienen en común los programas en cuestión de excedentes, es decir, tienen el mismo comportamiento mes a mes. PV\*SOL es la herramienta que simula más excedentes seguido de PVsyst.

Para el autoconsumo, las tres herramientas presentan la misma tendencia que en los excedentes excepto el mes de abril en Solarius PV (mayor que marzo y mayo); aun cuando comparten el mismo valor de irradiación solar. Solarius PV tiene el mayor autoconsumo (49,79%), pero menor energía generada entre las tres herramientas, por tal motivo sus excedentes son menores que PVsyst y PV\*SOL.

La Tabla 28 presenta el desempeño energético para el peor y mejor día de cada software. El Anexo D presenta las curvas de operación diaria y la fecha para estos días.

**Tabla 28.**

*Mejor y peor día de generación del SFV (vivienda unifamiliar)*

Programa	Solaris PV	PV*SOL	SAM	PVsyst
Desempeño mejor día [kWh]	4,56	7,65	-	7,28
Desempeño peor día [kWh]	4,04	0,52	-	1,08

La Tabla 28 muestra que Solaris PV presenta una distribución equitativa para el desempeño diario, mientras que PV\*SOL y PVsyst presentan grandes variaciones entre su mejor y peor día de generación.

#### 4.2 SFV conectado a la red UIS

La Tabla 29 presenta los resultados del dimensionamiento para un año de la UIS.

**Tabla 29.**

*Dimensionamiento del SFV (UIS)*

Parámetro	Solaris PV	PV*SOL	SAM	PVsyst
Irradiación solar [MWh/m <sup>2</sup> ]	1,73	1,73	1,86	1,73
Desempeño energético [GWh]	2,28	2,62	2,53	2,56
Producción específica [MWh/kWp]	1,30	1,50	1,44	1,46
Índice de rendimiento (PR) [%]	75,47	86,9	77	83,9
Energía inyectada a la red [MWh]	183,23	200,69	2526	183,21
Energía para autoconsumo [GWh]	2,10	2,42	-	2,37
Energía tomada de la red [GWh]	5,90	5,58	8	5,63
Energía inyectada a la red [%]	8,05	7,65	-	7,16
Energía para autoconsumo [%]	91,95	92,35	-	92,84

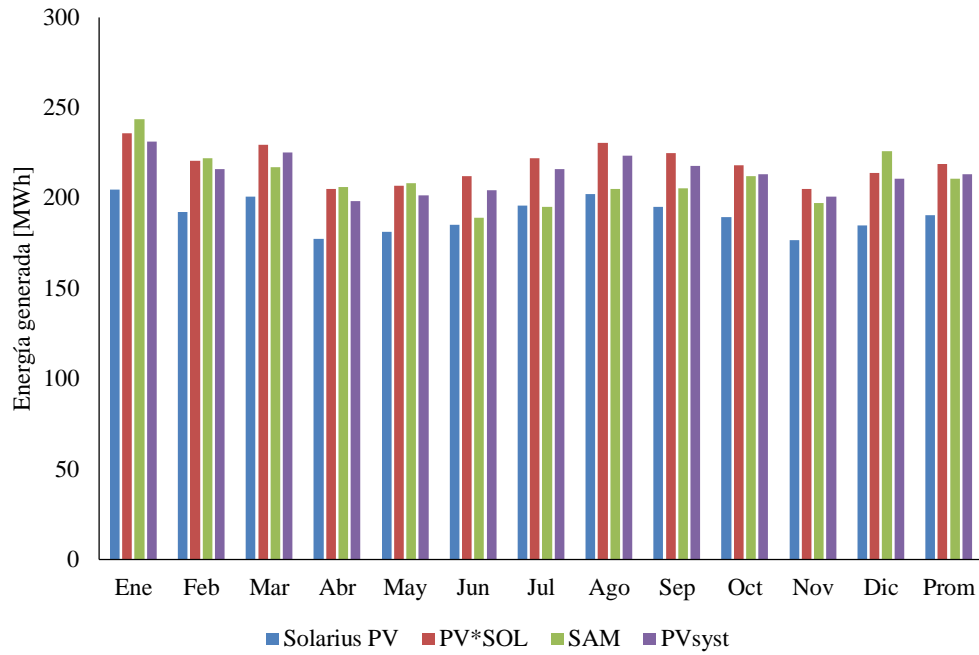
Al igual que en el caso de la vivienda unifamiliar PV\*SOL simula el mejor desempeño anual de las cuatro herramientas estudiadas y Solarius PV simula el menor desempeño. SAM presenta los mejores datos de irradiación solar, sin embargo, simula menor desempeño energético que PV\*SOL y PVsyst, evidenciado en la producción específica y PR (menor entre los tres). Solarius PV, PV\*SOL y PVsyst simularon altos porcentajes de energía destinados para autoconsumo, debido a la alta demanda que presenta la UIS. PV\*SOL, SAM y PVsyst simularon un desempeño energético capaz de satisfacer el 30% de la demanda de la UIS (2,4 GWh) sin sobrepasar el área disponible.

La Figura 19 muestra el desempeño mensual de las cuatro herramientas estudiadas. Este caso comparte los mismos datos meteorológicos que la vivienda unifamiliar, siguiendo en la mayoría de meses la misma tendencia de desempeño energético del caso anterior. Solarius PV sigue siendo el que menor desempeño simula durante los meses.

SAM simula un mejor desempeño en cinco de los doce meses (enero, febrero, abril, mayo, y diciembre). Sin embargo, su disminución en los otros meses hace que tenga menor desempeño anual que PV\*SOL y PVsyst.

**Figura 19.**

*Desempeño mensual del SFV (UIS)*



La Tabla 30 presenta los excedentes de energía y el autoconsumo mes a mes simulados, estos valores son representados en la Figura 20.

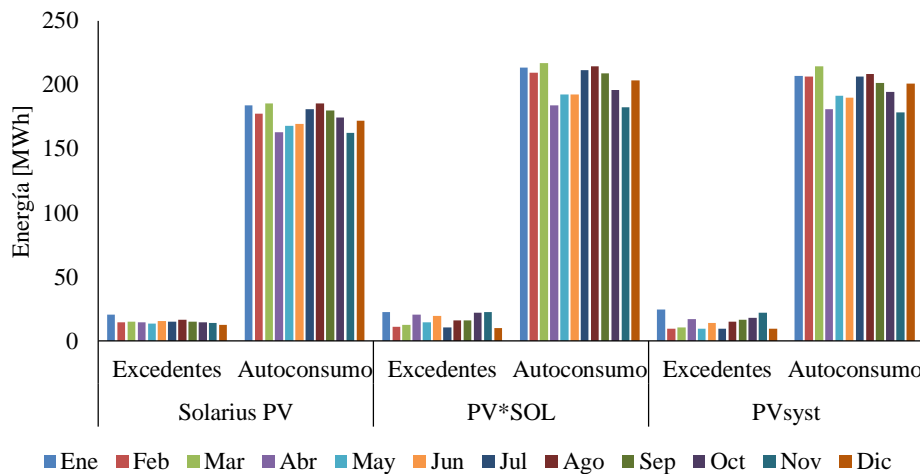
**Tabla 30.**

*Excedentes y autoconsumo del SFV (UIS)*

Mes	Solarius PV [MWh]		PV*SOL [MWh]		PVsyst [MWh]	
	Excedentes	Autoconsumo	Excedentes	Autoconsumo	Excedentes	Autoconsumo
Ene	20,94	183,70	22,79	213,17	24,66	206,70
Feb	14,86	177,47	11,33	209,15	9,59	206,40
Mar	15,34	185,51	12,73	216,75	10,86	214,40
Abr	14,54	163,05	20,94	183,96	17,13	181,15
May	13,50	167,71	14,75	192,23	9,93	191,40
Jun	15,71	169,38	19,89	192,26	14,18	190,11
Jul	15,06	180,71	10,73	211,25	9,50	206,44
Ago	16,70	185,32	16,29	214,31	15,02	208,33
Sept	15,42	179,85	16,11	208,70	16,72	201,17
Oct	14,96	174,53	22,22	196,04	18,46	194,64
Nov	14,28	162,43	22,57	182,43	22,14	178,47
Dic	12,89	171,98	10,33	203,52	9,97	200,81
<b>Total</b>	<b>184,21</b>	<b>2101,56</b>	<b>200,68</b>	<b>2423,78</b>	<b>178,17</b>	<b>2380,04</b>

**Figura 20.**

*Excedentes y autoconsumo del SFV (UIS)*



La Figura 20 muestra que PV\*SOL y PVsyst siguen una tendencia mes a mes de excedentes y autoconsumo con valores similares. Solarius PV tiene una tendencia similar en el autoconsumo respecto de las otras herramientas. Solarius PV sigue siendo el que simula el menor desempeño de

las cuatro herramientas estudiadas, aun cuando todos tuvieron las mismas consideraciones de CI y demanda.

La Tabla 31 muestra el desempeño energético para el mejor y peor día de simulación en cada software. Este caso confirma que Solarius PV no tiene mayor diferencia en el desempeño del mejor y peor día como se evidencia en PV\*SOL y PVsyst. El Anexo D presenta las gráficas de operación y fechas del mejor y peor día para cada software.

**Tabla 31.**

*Mejor y peor día de generación del SFV (UIS)*

<b>Programa</b>	<b>Solarius PV</b>	<b>PV*SOL</b>	<b>SAM</b>	<b>PVsyst</b>
Desempeño mejor día [MWh]	6,87	11,43	-	11,13
Desempeño peor día [MWh]	5,03	0,81	-	1,66

### 4.3 SFV aislado de la finca residencial

Para la simulación en PV\*SOL fue necesario realizar un deslastre de carga del 10,27% de la demanda, ya que el software no permitía la simulación con el 100%. Descrito esto, PV\*SOL tuvo una fracción solar (porcentaje de demanda atendida) del 89,73%. Solo PVsyst permite realizar el dimensionamiento con la probabilidad de carga desatendida (PLOL por sus siglas en inglés), la cual se definió de un 5%. La Tabla 32 presenta los resultados de dimensionamiento para un año de la finca residencial.

**Tabla 32.**

*Dimensionamiento del SFV (finca residencial)*

<b>Parámetro</b>	<b>Solarius PV</b>	<b>PV*SOL</b>	<b>SAM</b>	<b>PVsyst</b>
Irradiación solar anual [MWh/m <sup>2</sup> ]	1,75	1,75	1,97	1,76

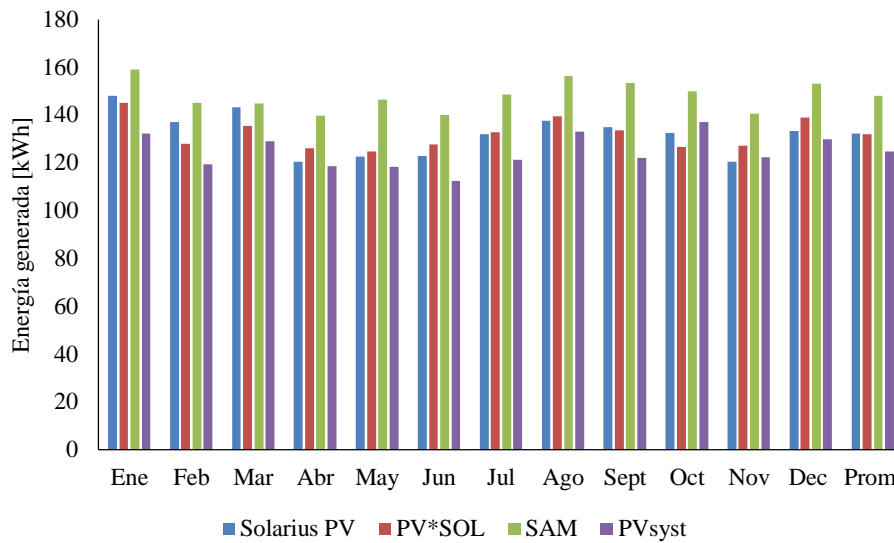
Desempeño energético [MWh]	1,59	1,58	1,78	1,50
Producción específica [MWh/kWp]	1,32	1,45	1,48	1,40
Índice de rendimiento (PR) [%]	75,5	82,8	75	69,55
Fracción solar [%]	-	89,73	-	98,37
Energía suministrada al SA [MWh]	-	1,11	0,44	1,02
Energía suministrada desde el SA a la carga [kWh]	240,90	875	434,05	962,85
Energía suministrada a la demanda [kWh]	-	475,6	-	470,61

SAM es el software que simula el mejor desempeño para este SFV. PV\*SOL simula un desempeño energético mayor respecto de PVsyst, sin embargo, la fracción solar de PV\*SOL fue de 89,73% respecto al 98,37% obtenido en PVsyst, evidenciando que el esquema utilizado por PVsyst es más eficiente respecto al utilizado por PV\*SOL. Solarius PV y SAM no entregan datos de fracción solar.

La Figura 21 muestra el desempeño mensual para cada software.

**Figura 21.**

*Desempeño mensual del SFV (finca residencial)*

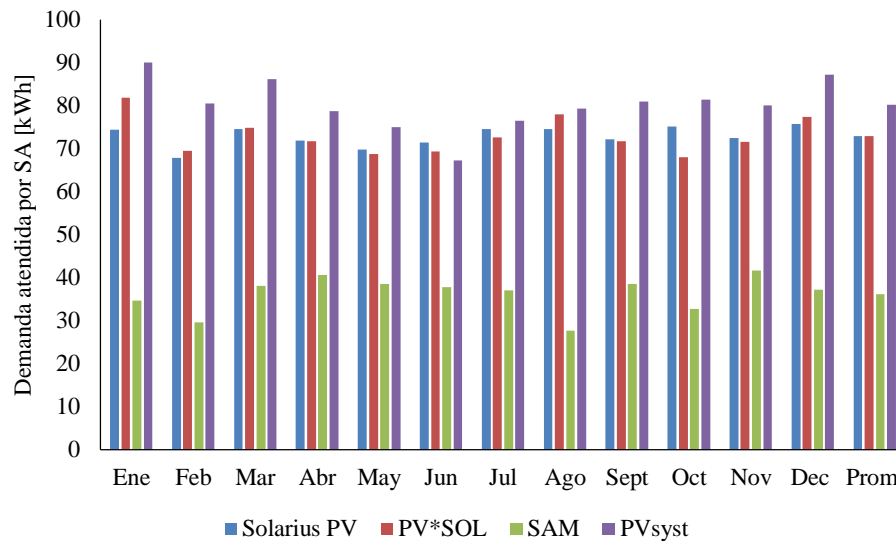


La Figura 21 evidencia que este caso no continúa con la tendencia de desempeño mensual que tenían los SFV conectados a la red. SAM simula mejor desempeño de los cuatro. PVsyst simula el menor desempeño, pero es suficiente para atender el 98,37% de la demanda anual.

La Figura 22 muestra la demanda atendida por el SA mes a mes.

**Figura 22.**

*Demanda atendida por el SA (finca residencial)*

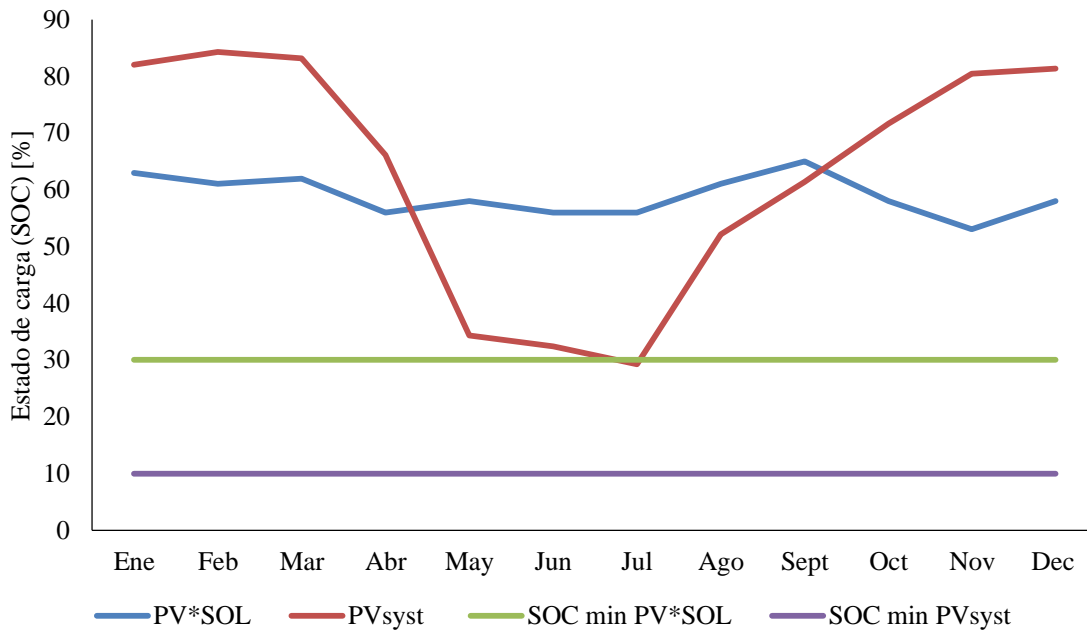


La Figura 22 indica que PVsyst simula el mejor desempeño en cuestión de la demanda atendida por el SA, evidenciado en la mayor fracción solar, aun cuando fue el que menor desempeño simuló durante los doce meses como se observa en la Figura 21. PV\*SOL y Solarius PV simulan desempeños similares en el promedio mensual.

La Figura 24 muestra el estado de carga (SOC) del SA durante el año, solo PVsyst y PV\*SOL presentan estos datos. PVsyst presenta una caída abrupta del SOC en los meses de mayo, junio y julio, coincidiendo con los peores meses de desempeño mostrados en la Figura 21, indicando la necesidad de utilización del SA para satisfacer la demanda. Sin embargo, no excede el  $SOC_{min}$  establecido por la batería utilizada (10%). PV\*SOL presenta un SOC promedio entre el 55% y 70%, lo que indica que el SA está bien dimensionado (*Solar Electric Systems for Africa: A Guide for Planning and Installing Solar ... - Mark Hankins - Google Libros, n.d.*).

**Figura 23.**

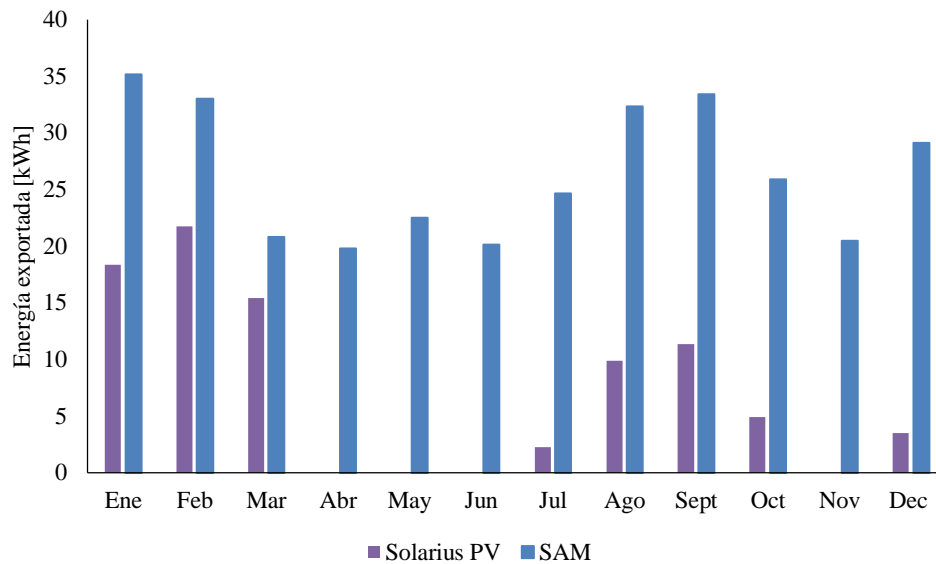
*SOC promedio mensual del SFV (finca residencial)*



La Figura 24 muestra la energía exportada por Solarius PV y SAM. De lo anterior se confirma que estos dos trabajan como un SFV conectado a la red con SA y no como un SFV aislado. SAM presenta la opción de cargar el SA únicamente desde el arreglo FV y así fue configurado.

**Figura 24.**

*Energía exportada del SFV (finca residencial)*



La Tabla 33 muestra el mejor y peor día además del porcentaje de la demanda atendida para el desempeño simulado por cada software. El Anexo D muestra las gráficas de operación para estos días.

**Tabla 33.**

*Mejor y peor día de generación del SFV (finca residencial)*

Programa	Solarius PV	PV*SOL	SAM	PVsystem
Desempeño mejor día [kWh]	4,78	6,55	-	7,98
Demanda satisfecha [%]	100	70,32	-	100
Desempeño peor día [kWh]	4,02	1,17	-	1,85
Demanda satisfecha [%]	100	2,56	-	100

La Tabla 33 evidencia que PVsystem y Solarius PV en su mejor y peor día satisficieron el 100% de la demanda, esto indica un correcto dimensionamiento del SFV. PV\*SOL no atiende la

demanda en su totalidad en ninguno de los dos días, debido al deslastre de carga necesario durante el proceso de dimensionamiento.

#### 4.4 SFV aislado de la finca agropecuaria

PV\*SOL no permitía simular con el 100% de la demanda, por tal motivo fue necesario realizar un deslastre de carga del 18,1%. Descrito esto, PV\*SOL tuvo una fracción solar del 81,9%. Se definió un PLOL del 5% para el software PVsyst. La Tabla 34 presenta los resultados de dimensionamiento para este caso.

**Tabla 34.**

*Dimensionamiento del SFV (finca agropecuaria)*

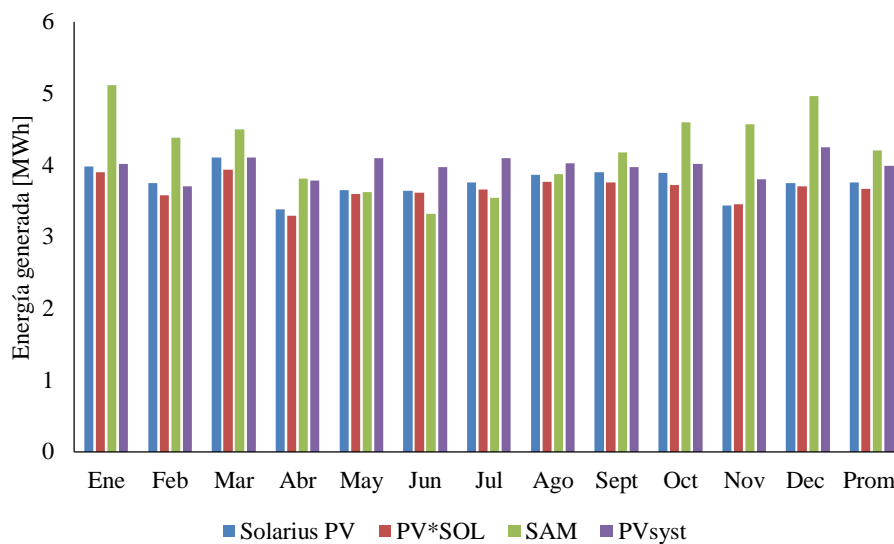
Parámetro	Solarus PV	PV*SOL	SAM	PVsyst
Irradiación solar anual [MWh/m <sup>2</sup> ]	1,80	1,83	2,25	1,80
Desempeño energético [MWh]	45,09	44,08	50,65	47,830
Producción específica [MWh/kWp]	1,38	1,49	1,76	1,44
Índice de rendimiento (PR) [%]	75	83,6	78	54,19
Fracción solar [%]	-	81,9	-	98,79
Energía suministrada al SA [MWh]	-	43,51	6,66	46,49
Energía suministrada desde el SA a la demanda [MWh]	41,55	36,96	6,30	44,26
Energía suministrada a la demanda [MWh]	-	0,573	-	1,34

SAM es el software que mayor desempeño anual simula, debido a que integra el SFV conectado a la red y no tiene limitaciones en el SA. PVsyst presenta un desempeño anual mejor que PV\*SOL y se ve evidenciado en la fracción solar, confirmando que el esquema utilizado por PVsyst es el más eficiente de los cuatro programas para el SFV aislado.

La Figura 25 muestra el desempeño mensual para cada software. PV\*SOL fue el que menor desempeño simuló de las cuatro herramientas debido al deslastre de carga que fue necesario utilizar. En ocho de los doce meses se mantiene la tendencia de desempeño, siendo PV\*SOL el que menor desempeño simula, seguido por Solarius PV, PVsyst y SAM, respetivamente. PVsyst cambia esta tendencia entre mayo y agosto simulando el mejor desempeño. SAM simula el desempeño más bajo de las cuatro herramientas únicamente en el mes de junio.

**Figura 25.**

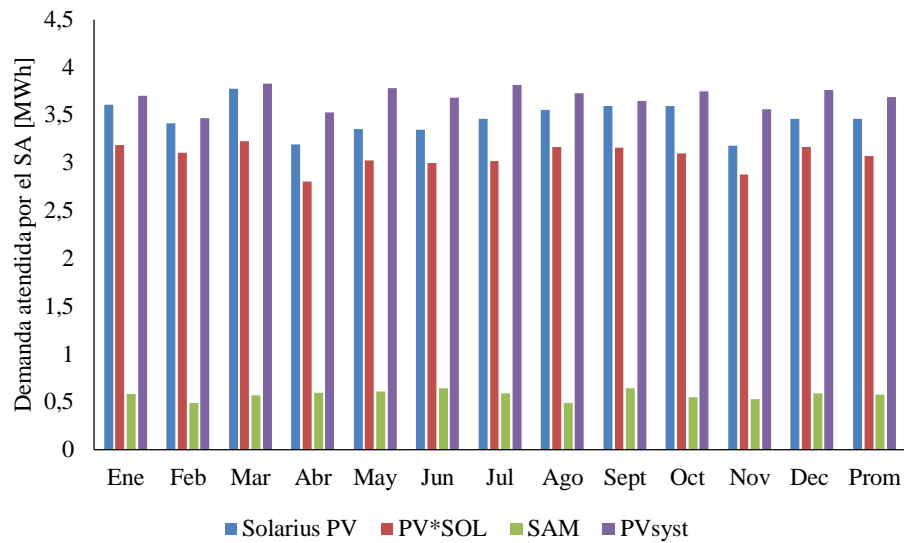
*Desempeño mensual del SFV (finca agropecuaria)*



En la finca agropecuaria la actividad principal es la crianza de peces y es necesario oxigenar el agua durante las noches, en consecuencia, la mayor parte de la demanda se presenta durante este periodo. La Figura 26 muestra la demanda atendida por el SA durante el año.

**Figura 26.**

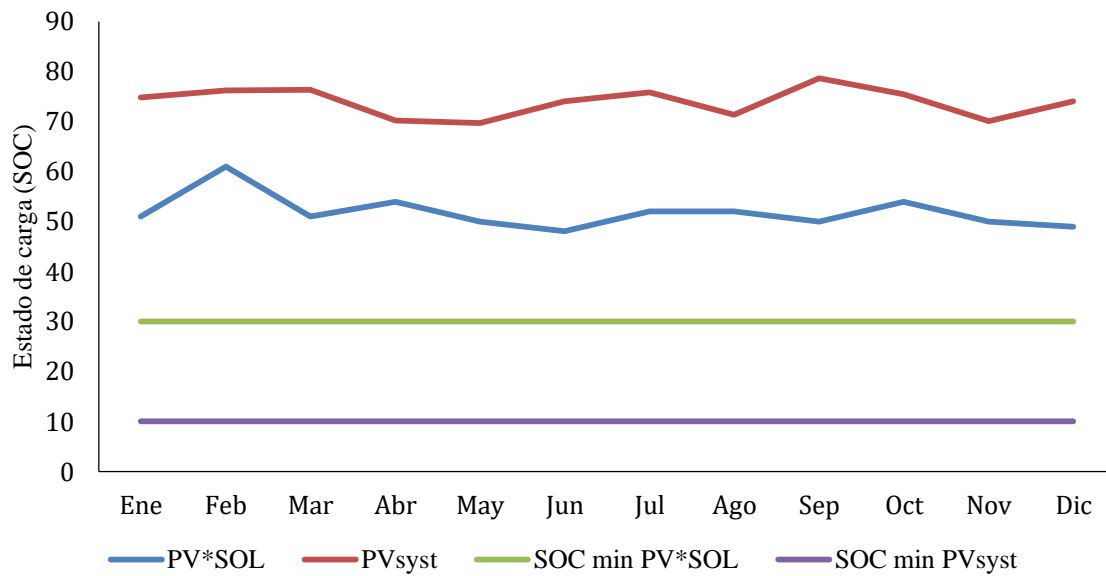
*Demanda atendida por el SA (finca agropecuaria)*



El SA fue dimensionado con dos días de autonomía en los programas Solarius PV, PVsyst y PV\*SOL. Para garantizar la autonomía del SFV, el arreglo FV necesita ser sobredimensionado, por tal razón PVsyst seleccionó una cantidad mayor de paneles FV (120) respecto a PV\*SOL (77), Solarius PV (83) y SAM (72). La Figura 28 muestra el SOC promedio para este caso.

**Figura 27.**

*Estado de carga promedio del SA (finca agropecuaria)*

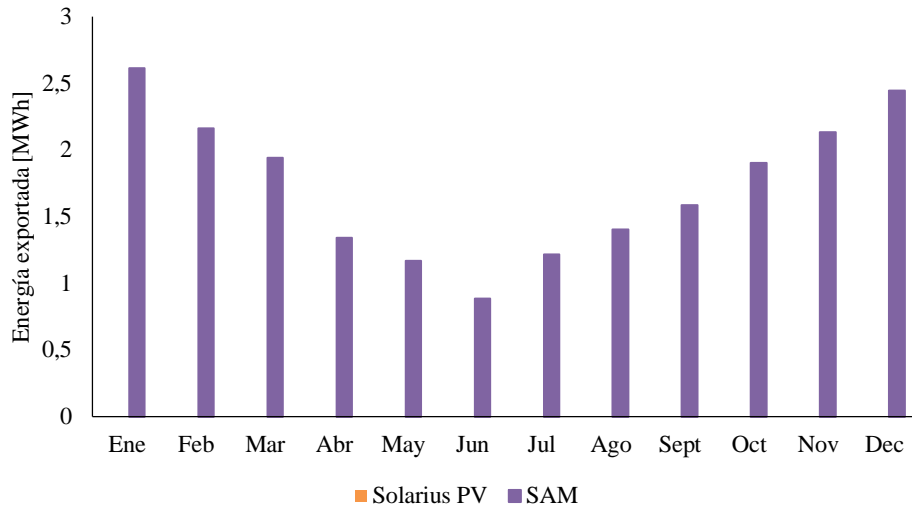


La Figura 27 presenta a PVsyst con un porcentaje del SOC entre 70% y 80%, indicando que el SA estuvo dimensionado correctamente. PV\*SOL mantiene el SOC entre 48% y 62%, y teniendo en cuenta el deslastre de carga utilizado, se puede concluir que la cantidad de paneles FV puede estar por debajo de lo adecuado para este SFV. PV\*SOL durante el proceso de dimensionamiento no permitía la simulación con una CI dos veces mayor que la potencia nominal del arreglo de cargadores/inversores del SA.

La Figura 28 muestra la energía exportada a la red. Solarius PV simula un desempeño que puede atender el 98,5% de la demanda, por tal motivo en este caso no tendrá exportaciones de energía.

**Figura 28.**

*Energía exportada a la red del SFV (finca agropecuaria)*



La Tabla 35 muestra el porcentaje de demanda atendida en el mejor y peor día de simulación. El Anexo D muestra las gráficas de operación y fechas para estos días.

**Tabla 35.**

*Mejor y peor día de generación del SFV (finca agropecuaria)*

Programa	Solarius PV	PV*SOL	SAM	PVsyst
Desempeño mejor día [kWh]	128,3	164,66	-	283,11
Demanda satisfecha [%]	97,27	100	-	89,18
Desempeño peor día [kWh]	112,7	26,94	-	41,78
Demanda satisfecha [%]	86,91	0	-	100

La Tabla 35 evidencia que Solarius PV no presenta mayor variación entre los valores de desempeño diario, debido a que simula un valor cercano para el mejor y peor día. PVsyst no atiende la totalidad de la demanda en el mejor día porque el SA se descarga antes de empezar las horas

solares, pero si lo hace en el peor día. PV\*SOL atiende toda la demanda en el mejor día y el 0% durante el peor día. De lo anterior se concluye que PVsyst fue la mejor herramienta para este caso.

**4.5 Ventajas y desventajas a partir de los resultados entregados por cada software**

En el Capítulo 3 se presentan las características de cada software en el proceso de dimensionamiento. En la simulación de los SFV se identificaron características necesarias para el análisis de operación listadas en la Tabla 36. A continuación, se presentan los indicadores de valor:

**Tabla 36.**

*Características identificadas en el análisis de resultados de las herramientas de cómputo*

✓	✗
Ventaja	Desventaja

	Características	Solaris PV	PV*SOL	SAM	PVsyst
1	Valor de energía para autoconsumo	✓	✓	✗	✓
2	Valor de energía inyectada a la red	✓	✓	✓	✓
3	Valor de excedentes	✓	✓	✗	✓
4	Producción específica	✓	✓	✓	✓
5	Índice de rendimiento	✗	✓	✓	✓
6	Operación diaria (mejor y peor)	✓	✓	✗	✓
7	Índice PLOL (porcentaje de demanda que no se va a suplir)	✗	✗	✗	✓
8	Índice de fracción solar (SFV aislado)	✗	✗	✗	✓
9	Energía suministrada al SA	✗	✓	✓	✓
10	Energía suministrada desde el SA a la carga	✓	✓	✓	✓
11	SOC diario	✗	✓	✗	✓
12	Utilizar deslastre de carga	✓	✗	✓	✓

La Tabla 37 resume los parámetros de dimensionamiento y operación identificados por medio de los cuatro casos de estudio a partir de las herramientas PV\*SOL, PVsyst, Solarius PV y SAM.

**Tabla 37.**

*Parámetros de dimensionamiento y operación de los SFV*

Tipo de SFV	Parámetros de dimensionamiento		Parámetros de operación	
	Nombre	Significado	Nombre	Significado
Conectado a la red	Irradiación incidente	Energía solar disponibles en la zona de la instalación FV	Producción específica	Relación entre la energía generada y cada kWp instalado
	Temperatura ambiente	Temperatura de la zona de la instalación FV	Índice de rendimiento	Indicador de calidad de la instalación
	Perfil de carga	Necesidad energética del usuario	Desempeño energético	Energía generada por el SFV
	Parámetros de selección de equipos, ver Tabla 4.	Características eléctricas de cada equipo	Energía para autoconsumo	Energía destinada para satisfacer la demanda del usuario desde el SFV
	Conexión de equipos	Cumplimento de las características eléctricas del conjunto de equipos	Energía tomada de la red	Energía necesaria para complementar la demanda del usuario
			Energía inyectada a la red	Energía excedente del SFV
			Temperatura de operación	Temperatura de la superficie del panel FV (influye en la generación del SFV)
Aislado	Irradiación incidente	Energía solar disponibles en la zona de la instalación FV	Producción específica	Relación entre la energía generada y cada kWp instalado
	Temperatura ambiente	Temperatura de la zona de la instalación FV	Índice de rendimiento	Indicador de calidad de la instalación
	Perfil de carga	Necesidad energética del usuario	Fracción solar	Porcentaje de demanda atendida por el SFV

	Parámetros de selección de equipos, ver Tabla 4	Características eléctricas de cada equipo	Energía suministrada en AC	Energía generada por el SFV
	Conexión de equipos	Cumplimiento de las características eléctricas del conjunto de equipos	Energía suministrada al SA	Energía de salida del arreglo FV al SA
	Días de autonomía	Cantidad de días que el SFV puede suministrar energía	Energía desde el SA hasta la demanda	Demanda abastecía por el SA
	PLOL	Probabilidad de pérdida de carga	Energía suministrada a la demanda	Energía destinada para autoconsumo
	$SOC_{min}$	El estado de carga mínimo admisible de la batería	SOC	El estado de carga del SA

### 5. Entregables del seminario de investigación

Como resultado final del seminario de investigación se tiene una carpeta por cada una de las trece (13) sesiones, donde se incluye la totalidad de la temática. La Tabla 38 describe el contenido de cada carpeta.

**Tabla 38.**

*Contenido de los entregables del seminario de investigación*

Nombre de la carpeta	Contenido de las carpeta
<b>Archivos en común de todas las carpetas de las sesiones</b>	
	-Documento con información teórica (formato PDF)
	-Presentación sintetizada del documento (diapositivas en formato PDF)
	-Videos de la presentación (formato mp4)

-Acta con el desarrollo de cada sesión (formato PDF)

<b>Archivos adicionales de las siguientes sesiones</b>	
<b>Sesión 7</b>	-Hoja de cálculo del dimensionamiento FV por parte del seminario (formato xlsx) -Carpeta de las simulaciones de los cuatro casos de estudio (formato pvprj)
<b>Sesión 8</b>	-Carpeta de las simulaciones de los cuatro casos de estudio (formato slrp2) y su respectivo informe (formato PDF)
<b>Sesión 9</b>	-Carpeta de las simulaciones de los cuatro casos de estudio (formato sam) y su respectivo informe (formato PDF)
<b>Sesión 10</b>	-Carpeta de las simulaciones de los cuatro casos de estudio (formato zip) y su respectivo informe (formato PDF)
<b>Sesión 12</b>	-Carpeta de apéndices que incluyen ejemplos de propuestas comerciales (formato PDF)

Estos archivos adicionales pueden ser consultados en el Semillero de Investigación en Generación Distribuida (SIGED) perteneciente al Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL).

## 6. Trabajos futuros

A continuación, se presentan consideraciones de temáticas a profundizar en trabajos futuros de proyectos de grado que involucren SFV.

- Realizar el cálculo de pérdidas por sombreado en los SFV, implementando el editor BIM integrado en el software Solarius PV.

- Determinar la viabilidad financiera del SFV a través de las herramientas computacionales.

- Realizar un análisis comparativo seleccionando otras herramientas computacionales que cumplan con características similares a las estudiadas en este trabajo de grado.
- Realizar un análisis detallado sobre la normativa colombiana para FNCE.
- Realizar un manual para el dimensionamiento y análisis de operación de los SFV de las herramientas PVsyst y Solarius PV.
- Realizar el dimensionamiento de SFV a partir de la programación en Simulink.
- Realizar el dimensionamiento del SFV de la E3T en las herramientas de cómputo PVsyst y Solarius PV para compararlo con datos de medición en tiempo real.

## 7. Conclusiones

El potencial solar es determinante en la generación de energía del SFV, siempre y cuando se dimensione correctamente el arreglo FV y se seleccionen los equipos adecuados, de lo contrario se desaprovecha el recurso solar.

Los parámetros de selección de los equipos que conforman un SFV, indican las condiciones eléctricas para acoplar correctamente los componentes entre sí. Una mala elección de los equipos representa pérdidas en el sistema, mal funcionamiento y daños en los mismos.

Los beneficios económicos (exención del IVA, gravamen arancelario y régimen de depreciación acelerada) y tributarios (deducción sobre el impuesto de la renta) establecidos dentro del marco legal colombiano pueden crear interés en la implementación de proyectos de SFV lo

que conlleva al incremento de la investigación y desarrollo en este tipo de generación de energía eléctrica.

Solaris PV, PVsyst y PV\*SOL entregan algunos resultados (energía excedente, tomada de la red, de autoconsumo e inyectada a la red) con los cuales se pueden determinar el comportamiento de los SFV como autogeneradores y generadores distribuidos según la normativa regulatoria vigente en Colombia

Las cuatro herramientas de cómputo implementadas cuentan con características valiosas que proporcionan al usuario asistencia en el desarrollo de dimensionamiento; sin embargo, entre los cuatro programas, SAM presenta falencias en componentes del SFV aislado y algunas ayudas de dimensionamiento siendo el menos completo.

Las cuatro herramientas computacionales son útiles para el dimensionamiento del SFV conectado a la red. Sin embargo, PV\*SOL es el más recomendado para dimensionar estos SFV porque cumplió con la mayor cantidad de criterios y presentó el mejor desempeño en los resultados de simulación.

Para dimensionar SFV aislados, se recomienda utilizar PVsyst, debido a que los otros programas presentaron problemas de dimensionamiento (deslastre de carga y no cuentan con controlador/regulador) y tomaban o exportaban energía de la red.

Solaris PV y SAM, no son programas adecuados para el dimensionamiento de SFV aislados, debido a que al momento de simular el SFV entregaron excedentes de energía a la red tomándolo como un SFV conectado a la red con SA.

SAM, al ser un software gratuito y entregar resultados confiables, puede ser utilizado como primera opción por MiPymes (pequeñas y medianas empresas) que deseen empezar su vida laboral

en el mercado de SFV conectados a la red, considerando que el marco regulatorio exige una simulación para la aprobación del proyecto.

PV\*SOL tiene la interfaz más didáctica durante el proceso de dimensionamiento, ofreciendo ayudas visuales y virtuales, por lo que este software puede ser utilizado tanto para la academia como para la industria.

PV\*SOL y PVsyst son las herramientas más completas para analizar la operación de SFV, porque entregan datos y gráficas diarias de las diferentes variables que conforman el SFV. SAM no entrega resultados de operación diaria haciendo menos preciso el análisis del comportamiento del SFV.

SAM y PVsyst presentan en sus resultados el diagrama de flujo de energía, con los cuales fácilmente se puede identificar el funcionamiento del SFV, el porcentaje de pérdidas debido a parámetros climatológicos y la operación de los equipos.

Solaris PV y PVsyst cuentan con la licencia completa por parte de la UIS, por tal motivo el proceso de apropiación e implementación de los SFV resultó más sencillo y rápido en comparación con la herramienta PV\*SOL, donde fue necesario la utilización de las versiones de prueba en varios equipos de cómputo.

### Referencias Bibliográficas

Adar, M., Bazine, H., Najih, Y., & Chebak, A. (n.d.). *Simulation Study of three PV Systems*.

Agencia Internacional de Energías Renovables. (n.d.). *IRENA*. <https://www.irena.org/>

Agrawal, M., Kumar Saxena, B., & Rao, K. V. S. (2018). Feasibility of establishing solar photovoltaic power plants at existing wind farms. *Proceedings of the 2017 International Conference On Smart Technology for Smart Nation, SmartTechCon 2017*, 251–256.

Aguilera, J., & Hontoria, L. (n.d.). *Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos*.

Ajgaonkar, Y., Bhirud, M., & Rao, P. (2019). Design of Standalone Solar PV System Using MPPT Controller and Self-Cleaning Dual Axis Tracker. *2019 5th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems, ICACCS 2019*, 27–32. <https://doi.org/10.1109/ICACCS.2019.8728494>

Anagha, M. J., Rao, S. N., & Bennaceur, K. (2018). A Survey of Solar Irradiance Measurement Techniques. *2018 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research, ICCIC 2018*, 2018–2021.

Arif, M. T., Oo, A. M. T., Ali, A. B. M. S., & Shafiullah, G. M. (2015). *Predict System Efficiency of 1 MWc Photovoltaic Power Plant Interconnected to the Distribution Network using PVSYST Software*. 3–8.

*AUTOCONSUMO FOTOVOLTAICO CON BATERÍAS: DIFERENCIAS ENTRE INVERSORES HÍBRIDOS On-Grid Y INVERSORES CARGADORES Off-Grid - QKSOL - Energy Solutions*. (n.d.). Retrieved June 4, 2020, from <https://qksol.com/diferencias-entre-inversores-hibridos-y-inversores-cargadores/>

Bouzuenda, M., Al Omair, A., Al Naeem, A., Al-Muthaffar, M., & Wazir, O. B. (2014). Design

of an off-grid 2 kW solar PV system. *2014 9th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies, EVER 2014*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/EVER.2014.6844001>

Camargo Carvajal, J. E., & Dallos Castellanos, Á. (2011). *Evaluación de potencial de generación de energía eléctrica por medio de paneles fotovoltaicos en las edificaciones y zonas endurecidas de la sede central de la Universidad Industrial de Santander*. September, 18–46.

Casa, M., & Barrio, M. (2012). *Instalaciones solares fotovoltaicas* (2012th, MARC ed.).

Claudia, E. (2017). *Guía metodológica para la implementación de sistemas fotovoltaicos a pequeña escala en Colombia*. 81–94.

Colombiana, N. T., Conexión, E. D. E., & Medición, P. (n.d.). *NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. 5019*, 24–36.

Comisión de Regulación de Energía y Gas - CREG. (2018). *Resolucion 30 de 2018*.

Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). (2015). *Resolución CREG 024 de 2015. 151(49)*, 10–17. <https://doi.org/10.1145/3132847.3132886>

Congreso de la República de Colombia. (2014). *Ley 1715 de 2014* (Vol. 2014, Issue August, pp. 1–43).

De Oliveira, H. M., & De Aguiar Sodre, E. (2018). Study of a grid-tied photovoltaic system in Caruaru using PVsyst and Skelion. *SBSE 2018 - 7th Brazilian Electrical Systems Symposium*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/SBSE.2018.8395615>

Dubey, K., & Shah, M. T. (2017). Design and simulation of Solar PV system. *International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques, ICACDOT 2016*, 568–573. <https://doi.org/10.1109/ICACDOT.2016.7877649>

Estimación, I. (n.d.). *Cálculos Instalación fotovoltaica*.

- Fazelpour, F., Shariatzadeh, M., & Soltani, N. (2016). Techno-economic feasibility of grid-connected photovoltaic power plant in Qeshm Island, Iran. *EEEIC 2016 - International Conference on Environment and Electrical Engineering*. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2016.7555641>
- Fendri, D., Ammous, M., & Chaabene, M. (2017). PV/Batteries sizing under multi criteria consideration. *2017 8th International Renewable Energy Congress, IREC 2017, Irec*. <https://doi.org/10.1109/IREC.2017.7926009>
- Finca Agropecuaria, B. (2019). *UsoEnergeticoFincaAgro*.
- González, H. D. (2012). *Diseño De Un Sistema Fotovoltaico Para La Generación De Energía Eléctrica En El Cobaev 35 Xalapa*. 1–172. <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/31561/1/dominguezgonzalezhector.pdf>
- Harzli, K., Oueslati, H., Mabrouk, A. Ben, Mabrouk, S. B., & Zizzo, G. (n.d.). *Study and Simulation of Photovoltaic Installation Connected to the Grid with Storage System*.
- High, S., Poly, P., & Module, P. (2001). *HiKu*.
- Houria, H., & M. Shabat, M. (n.d.). *Sizing of a Photovoltaic LED Street Lighting System with PVsyst Software*. 3–7.
- IEEE. (1884). *Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc*. [https://www.ieee.org/about/at-a-glance.html?WT.mc\\_id=ab\\_lp\\_qui](https://www.ieee.org/about/at-a-glance.html?WT.mc_id=ab_lp_qui)
- Irwanto, M., Irwan, Y. M., Safwati, I., Leow, W. Z., & Gomesh, N. (2014). Analysis simulation of the photovoltaic output performance. *Proceedings of the 2014 IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference, PEOCO 2014, March*, 477–481. <https://doi.org/10.1109/PEOCO.2014.6814476>
- Isik, A. H., Engineering, E., Engineering, E., & Engineering, E. (2015). *Design of The Solar Energy System in ITU Faculty of Electric and Electronics W* ). 22–25.
- Jaiswal, P., Srivastava, S. K., & Sahay, K. B. (2016). Modeling and simulation of proposed 100

KW solar PV array power plant for MMMUT Gorakhpur. *International Conference on Emerging Trends in Electrical, Electronics and Sustainable Energy Systems, ICETEESES 2016*, 261–266. <https://doi.org/10.1109/ICETEESES.2016.7581391>

Jiang, Y., Abu Qahouq, J. A., & Batarseh, I. (2010). Improved solar PV cell matlab simulation model and comparison. *ISCAS 2010 - 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems: Nano-Bio Circuit Fabrics and Systems*, 2770–2773. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2010.5537014>

Kaddour, A., El Amine Bekkouche, S. M., Bezari, S., & Benyoucef, B. (2018). Optimization and evaluation of the photovoltaic system in a farm studio located in Ghardaia. *Proceedings of 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2018*, 5–8. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2018.8702279>

Karki, P., Adhinkary, B., & Sherpa, K. (2012). *Predict System Efficiency of 1 MWc Photovoltaic Power Plant Interconnected to the Distribution Network using PVSYST Software*. 196–199.

Khandelwal, A., & Shrivastava, V. (2017). Design and assessment of solar photovoltaic system for a village of Rajasthan. *Proceedings of IEEE International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies, ICCPCT 2017*. <https://doi.org/10.1109/ICCPCT.2017.8074274>

Kumar, N., Yadav, P., & Chandel, S. S. (2015). Comparative analysis of four different solar photovoltaic technologies. *International Conference on Energy Economics and Environment - 1st IEEE Uttar Pradesh Section Conference, UPCON-ICEEE 2015*. <https://doi.org/10.1109/EnergyEconomics.2015.7235077>

Le, T., Colin, H., Al Shakarchi, F., & Tran Quoc, T. (n.d.). *Improved Matlab Simulink Two-diode Model of PV Module and Method of Fast Large-Scale PV System Simulation*. 5, 5–8.

Llano, W. P., & Monta, S. P. (2016). *Implementación De Un Sistema Fotovoltaico Para Energizar Un Sistema De Oxigenación De Agua En La Crianza Y Reproducción De Truchas*. 96.

Mari Soucase, B., Aleman, J. P., & Guaita-Pradas, I. (2017). Design of a solar system installation in Marrakesch using the SKELION software tool. *Proceedings of 2016 International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2016*, 717–721. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2016.7983898>

- Markovic, M. L., & Ciric, R. M. (2017). Efficiency analysis of grid-connected photovoltaic power plants. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 3(3), 269–277. <https://doi.org/10.17775/cseejpes.2016.01100>
- Mathew, M., & Hossain, J. (2018). Analysis of a grid connected solar photovoltaic system with different PV technologies. *IEEE International Conference on Circuits and Systems, ICCS 2017, 2018-Janua(Iccs)*, 264–269. <https://doi.org/10.1109/ICCS1.2017.8326002>
- Meriem, C., Benyoucef, B., Asma, C., Mohamed, B. M., & Aicha, S. (2014). Study of a photovoltaic system connected to the network and simulated by the code PVSYST. *2014 North African Workshop on Dielectric Materials for Photovoltaic Systems, NAWDMPV 2014*. <https://doi.org/10.1109/NAWDMPV.2014.6997605>
- Minas, M. de. (2014). Resolución CREG 038 de 2014. In *Comision de Regulacion de Energia y Gas* (p. 65).
- DECRETO 829 de 2020, (2020). [https://dapre.presidencia.gov.co/normativa/normativa/DECRETO 829 DEL 10 DE JUNIO DE 2020.pdf](https://dapre.presidencia.gov.co/normativa/normativa/DECRETO_829_DEL_10_DE_JUNIO_DE_2020.pdf)
- Ministerio de Minas y Energía. (2014a). *Decreto 2469 del 2 de diciembre de 2014*. 3.
- Ministerio de Minas y Energía. (2014b). Decreto 2492 de 2014. *Diario Oficial*, 49.354, 3–6.
- Ministerio de Minas y Energía. (2015). *Decreto No. 2143 of 4 November 2015*. 1–8.
- Molina, A., & Martinez, F. (2017). Modelo de Generación Fotovoltaica. *Explorador Solar*, 13. <http://ernc.dgf.uchile.cl:48080/downloads/fotovoltaico.pdf>
- Muoka, P. I., Haque, M. E., & Negnetvitsky, M. (2011). A new tool for design optimization and cost estimation of stand-alone photovoltaic power plants. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. <https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039166>
- Nadkarni, S. S., Angadi, S., & Raju, A. B. (2018). Simulation and Analysis of MPPT Algorithms for Solar PV based Charging Station. *Proceedings of the International Conference on*

*Computational Techniques, Electronics and Mechanical Systems, CTEMS 2018*, 45–50.  
<https://doi.org/10.1109/CTEMS.2018.8769191>

No, A., & Bucaramanga, D. E. N. V. (2015). *REGLAMENTO ACADÉMICO – ESTUDIANTIL. 1982(72)*.

Óscarperpiñánlamigueiro, A., Colmenar, S., Manuel, A., & Castro, G. (2012). *DISEÑO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS*. Promotora General de Estudios, S.A.  
[https://www.soltuyo.com/libros/esf\\_img-051tco-4.pdf](https://www.soltuyo.com/libros/esf_img-051tco-4.pdf)

Patarau, T., Petreus, D., & Etz, R. (2015). Analysis and optimization of a geothermal, biomass, solar hybrid system: An application of PV\*Sol software. *Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology, 2015-Septe*, 370–375.  
<https://doi.org/10.1109/ISSE.2015.7248024>

Peña, J., & Esteban, J. (2016). *Estudio y desarrollo de una planta solar fotovoltaica*. 127.  
[http://oa.upm.es/44195/1/TFG\\_JAVIER\\_DE\\_LA\\_PEÑA\\_CARRASCOSA.pdf](http://oa.upm.es/44195/1/TFG_JAVIER_DE_LA_PEÑA_CARRASCOSA.pdf)

Planta Física de la UIS, O. B. (2019). *Uso energético de la UIS*.

REN21. (2020). Renewables 2020 Global Status Report. In *REN21 Secretariat*.  
<http://www.ren21.net/resources/publications/>

SA, Pv. (n.d.). *Features – PVsyst*. Retrieved July 12, 2020, from <https://www.pvsyst.com/features/>

Safarini, N. Al, Akash, O., Mohsen, M., & Iqbal, Z. (2017). Performance evaluation of solar tracking systems for power generation based on simulation analysis: Solar island concept. *2017 International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications, ICECTA 2017, 2018-Janua*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICECTA.2017.8251933>

Said, W., Gaber, H. A., & Mami, A. (2017). Sizing and simulation of an energy sufficient stand-alone PV pumping system. *Proceedings - 2017 International Conference on Promising Electronic Technologies, ICPET 2017*, 8–13. <https://doi.org/10.1109/ICPET.2017.8>

Sajjad, I. A., Manganelli, M., Martirano, L., Napoli, R., Chicco, G., & Parise, G. (2015). Net

metering benefits for residential buildings: A case study in Italy. *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering, IEEEIC 2015 - Conference Proceedings*, 1647–1652. <https://doi.org/10.1109/IEEEIC.2015.7165419>

Sanchez, B. C., Vary, M., Perny, M., Janicek, F., Saly, V., & Packa, J. (2017). Prediction and production of small PV power plant. *Proceedings of the 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2017*, 0–4. <https://doi.org/10.1109/EPE.2017.7967276>

Sangeetha, P., & Suja, S. (2017). Modeling and heuristic based optimal sizing of PV wind system. *Proceedings of IEEE International Conference on Innovations in Electrical, Electronics, Instrumentation and Media Technology, ICIEEIMT 2017, 2017-Janua(978)*, 359–363. <https://doi.org/10.1109/ICIEEIMT.2017.8116866>

Saraswat, R., & Sathans. (2017). Comparative performance evaluation of solar PV modules from different manufacturers in India by using PVsyst. *1st IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems, ICPEICES 2016*, 24–26. <https://doi.org/10.1109/ICPEICES.2016.7853288>

Saxena, G., & Gidwani, D. L. (2018). Estimation of energy production of grid connected rooftop solar photovoltaic system at Nagar Nigam Kota, Rajasthan. *3rd International Conference on Innovative Applications of Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with Their Impact on Humanity, CIPECH 2018*, 45–49. <https://doi.org/10.1109/CIPECH.2018.8724134>

Schmitt, W. (2002). Modeling and simulation of photovoltaic hybrid energy systems optimization of sizing and control. *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1656–1659. <https://doi.org/10.1109/pvsc.2002.1190935>

Sharma, R. (2017). *Grid Connected Solar PV System Design and Calculation By Using PV \* SOL Premium Simulation Tool for Campus Hostels of RTU Kota*. 10–14.

Sharma, S., Kurian, C. P., & Paragond, L. S. (2018). Solar PV System Design Using PVsyst: A Case Study of an Academic Institute. *2018 International Conference on Control, Power, Communication and Computing Technologies, ICCPCCT 2018*, 123–128. <https://doi.org/10.1109/ICCPCCT.2018.8574334>

- Sharma, V. P., Singh, A., Sharma, J., & Raj, A. (2016). Design and simulation of dependence of manufacturing technology and tilt orientation for 100kWp grid tied solar PV system at Jaipur. *2016 International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering, ICRAIE 2016*. <https://doi.org/10.1109/ICRAIE.2016.7939508>
- Simulink, M., & Mohammed, S. S. (2014). *System with Boost Converter using*. 814–821.
- Sobor, I. (2017). Photovoltaic pump system design for small irrigation. *2017 11th International Conference on Electromechanical and Power Systems, SIELMEN 2017 - Proceedings, 2017-Janua*, 315–320. <https://doi.org/10.1109/SIELMEN.2017.8123339>
- Solar Electric Systems for Africa: A Guide for Planning and Installing Solar ...* - Mark Hankins - Google Libros. (n.d.). Retrieved July 6, 2020, from [https://books.google.com.co/books?id=nPfp9CgTDxcC&pg=PA51&lpg=PA51&dq=state+of+charge+solar+battery+AGE&source=bl&ots=v09LEc4wZy&sig=ACfU3U2M9nCLim7zvKkIGp1xAfh7URqZdQ&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwj9l47Xuq\\_qAhUihOAKHWUYCDE4ChDoATACegQIChAB#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?id=nPfp9CgTDxcC&pg=PA51&lpg=PA51&dq=state+of+charge+solar+battery+AGE&source=bl&ots=v09LEc4wZy&sig=ACfU3U2M9nCLim7zvKkIGp1xAfh7URqZdQ&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwj9l47Xuq_qAhUihOAKHWUYCDE4ChDoATACegQIChAB#v=onepage&q&f=false)
- Soualmia, A., & Chenni, R. (2017). Modeling and simulation of 15MW grid-connected photovoltaic system using PVsyst software. *Proceedings of 2016 International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2016*, 702–705. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2016.7984069>
- Stein, J. S. (2012). The photovoltaic Performance Modeling Collaborative (PVPMC). *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 3048–3052. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2012.6318225>
- Tahiri, F. E., Chikh, K., & Khafallah, M. (2019). Modeling and performance analysis of a solar PV power system connected to a three phase load under irradiation and load variations. *Green Energy and Technology*, 1–23. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-1945-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-13-1945-7_1)
- Tarai, R. K., Chandola, V., & Kale, P. G. (2017). Development of the simplified predictive model for the estimation of annual PV energy production: A case study for Odisha. *3rd IEEE International Conference On*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/CIAC.2017.7977337>
- Thula, M., Kumar, M. N., & Reddy, V. S. (2017). Simulation and performance analysis of 100kWp

solar rooftop using Solar Pro software. *2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies, i-PACT 2017, 2017-Janua*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/IPACT.2017.8244917>

Tidjani, F. S., Chandra, A., & Pillay, P. (2014). Design of building integrated photovoltaic system to the grid with power quality improvement features for Central African countries. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2023–2029.

Tomás Díaz Corcobado, & Guadalupe Carmona Rubio. (n.d.). *Instalaciones solares fotovoltaicas. Und1. Componentes de Una Instalación Solar Fotovoltaica*. Retrieved June 4, 2020, from <https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf>

Unidad de Planeación Minero-Energética. (2015). *Resolución UPME 281 de 2015. 151(49)*, 10–17. <https://doi.org/10.1145/3132847.3132886>

Unidad de Planeación Minero Energetica (UPME). (2016). *Resolución 045 de febrero 3 de 2016* (p. 7).

Valdez, M. T., Ferreira, C. M., & Maciel Barbosa, F. P. (2018). Application of Virtual Reality Tools in the Teaching of Concepts in Projects of Fast Loading Stations. *2018 28th EAEEIE Annual Conference, EAEEIE 2018*, 1–9. <https://doi.org/10.1109/EAEEIE.2018.8534239>

Vilarino, L., Vilarino, J., Arenas, C., Nunez, G., & Menendez, H. (2014). Rendimiento Global de sistemas fotovoltaicos. *Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente*, 26.

Westbrook, O. W., & Collins, F. D. (2013). Energy model validation for large-scale photovoltaic systems. *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 830–835. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2013.6744274>

XM. (n.d.). *Glosario*.

Yaghi, M., El-Fouani, H., Assi, A., Noun, Z., Rammal, R., & Assi, I. (2018). Toward green LIU campuses using PV systems. *Proceedings of the International Conference on Microelectronics, ICM, 2017-Decem(ICM)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICM.2017.8268840>

Yao, T., Tang, Y., & Ayyanar, R. (2014). High Resolution Output Power Estimation of Large-

Scale Distributed PV Systems. *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 4620–4627. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2014.6954033>

Yuliawan, D. M. (2018). *Study and Design of Hybrid PV-Generator-Wind System for Communal And Administrative Load in North Maluku , Indonesia*. 3–8.

## Apéndices

### **Apéndice A. Características de la modalidad del trabajo de grado: seminario de investigación**

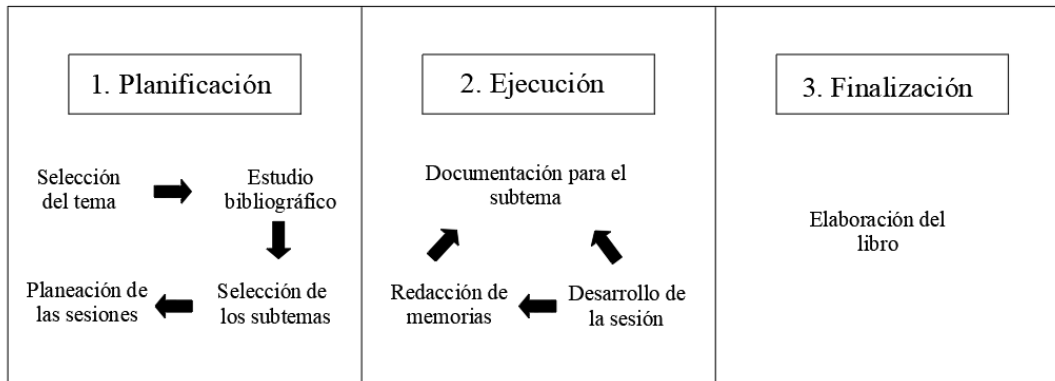
El desarrollo del trabajo de grado se realizó a través de la modalidad de seminario de investigación. El seminario de investigación, o seminario alemán, es una actividad académica que tuvo su origen en la Universidad de Göttingen a finales del siglo XVIII, donde se propone como estrategia de estudio para ofrecer mejor formación a los estudiantes investigadores. Es un grupo de aprendizaje activo, pues los participantes no reciben la información ya elaborada como convencionalmente se hace, sino que la indagan por sus propios medios en un ambiente de mutua colaboración. Su principal objetivo consiste en permitir que los estudiantes desarrollen habilidades y competencias de investigación relacionándolos con los tópicos del tema a tratar; dichas habilidades están orientadas al procesamiento de textos, búsqueda de información académica, capacidad de sustentación teórica y metodológica en forma verbal y por escrito. Los roles de los participantes que componen un seminario de investigación están dados en la siguiente Tabla.

Enlace:

[https://www.uis.edu.co/webUIS/es/trabajosdegrado/documentos/Jul2\\_trabajos\\_grado\\_doc3.pdf](https://www.uis.edu.co/webUIS/es/trabajosdegrado/documentos/Jul2_trabajos_grado_doc3.pdf)





<b>Rol</b>	<b>Aporte</b>
<b>Relator</b>	-Identificar, seleccionar y organizar materiales, textos y contenidos -Ser buen expositor, aprender a expresarse y argumentar en público -Sintetizar ideas y sacar sus propias conclusiones -Someterse a la crítica y al juicio colectivo, lo que genera
<b>Correlator</b>	-Saber escuchar y potenciar las habilidades de concentración, y realizar aportes de manera valorativa y critica
<b>Participantes</b>	-Autoevaluar su nivel de preparación en cuanto el tema -Desarrollar habilidades para dialogar, confrontar ideas, trabajar en grupo y respetar la opinión de los demás -Aprender a participar cuando es pertinente y necesario, registrando, anotando y organizando las ideas y argumentos cuando se desea intervenir, respetando y demostrando interés por apreciar y evaluar los argumentos contrarios
<b>Protocolante</b>	-Percibir y captar lo fundamentas de lo tratado en la sesión -Identificar los momentos más significativos y plasmarlo por escrito -Generar fuentes de producción intelectual a través de las memorias que son fruto del seminario




A partir de los roles indicados, se realizó una dinámica en el seminario con las siguientes etapas: planeación, ejecución y finalización; las cuales se relacionan entre sí, dependiendo cada una de la anterior como se muestra en la siguiente Figura.






A continuación, se muestra una Tabla donde se resume las fechas de la ejecución de cada una de las sesiones, indicando los roles de cada integrante.

Núm.	Título	Roles		Evidencia fotográfica
1	Variables climatológicas: potencial solar y temperatura promedio según su ubicación	<b>Jueves 26 de septiembre/2019</b>		
		Karen Yesenia Arias Romero	Relator	
		Yeny Alejandra Ortiz Lizcano	Correlator	
		Eduard Rodrigo Galvis González	Protocolante	
		Juan Manuel Villamil Padilla	Participante	
		Anyela Marcela Arenas Lara	Participante	
2	Demanda de potencia y energía	<b>Viernes 18 de octubre/2019</b>		
		Anyela Marcela Arenas Lara	Relator	
		Eduard Rodrigo Galvis González	Correlator	
		Yeny Alejandra Ortiz Lizcano	Protocolante	
		Juan Manuel Villamil Padilla	Participante	
Karen Yesenia Arias Romero	Participante			
3		<b>Miércoles 30 de octubre/2019</b>		

	Consideraciones para el dimensionamiento del SFV: parámetros de selección de equipos	Yeny Alejandra Ortiz Lizcano	Relator	
		Juan Manuel Villamil Padilla	Correlator	
		Anyela Marcela Arenas Lara	Protocolante	
		Eduard Rodrigo Galvis González	Participante	
		Karen Yesenia Arias Romero	Participante	
4	Consideraciones para el dimensionamiento del SFV: marco legal, regulatorio e impacto ambiental	<b>Jueves 7 de noviembre/2019</b>		
		Eduard Rodrigo Galvis González	Relator	
		Karen Yesenia Arias Romero	Correlator	
		Juan Manuel Villamil Padilla	Protocolante	
		Yeny Alejandra Ortiz Lizcano	Participante	
		Anyela Marcela Arenas Lara	Participante	
5	Consideraciones para el dimensionamiento del SFV: sistema de medición, monitoreo y comunicación	<b>Lunes 26 de noviembre/2019</b>		
		Juan Manuel Villamil Padilla	Relator	
		Anyela Marcela Arenas Lara	Correlator	
		Karen Yesenia Arias Romero	Protocolante	
		Yeny Alejandra Ortiz Lizcano	Participante	
		Eduard Rodrigo Galvis González	Participante	
6	Herramientas computacionales	<b>Jueves 30 de enero/2020</b>		
		Karen Yesenia Arias Romero	Relator	
		Yeny Alejandra Ortiz Lizcano	Correlator	
		Eduard Rodrigo Galvis González	Protocolante	
		Juan Manuel Villamil Padilla	Participante	

		Anyela Marcela Arenas Lara	Participante	
7	Dimensionamiento: herramienta PV*SOL	<b>Jueves 13 de febrero/2020</b>		
		Anyela Marcela Arenas Lara	Relator	
		Eduard Rodrigo Galvis González	Correlator	
		Yeny Alejandra Ortiz Lizcano	Protocolante	
		Juan Manuel Villamil Padilla	Participante	
		Karen Yesenia Arias Romero	Participante	
8	Dimensionamiento: herramienta Solarius PV	<b>Lunes 2 de marzo/2020</b>		
		Yeny Alejandra Ortiz Lizcano	Relator	
		Juan Manuel Villamil Padilla	Correlator	
		Anyela Marcela Arenas Lara	Protocolante	
		Eduard Rodrigo Galvis González	Participante	
		Karen Yesenia Arias Romero	Participante	
9	Dimensionamiento: herramienta SAM	<b>Lunes 16 de marzo/2020</b>		
		Yeny Alejandra Ortiz Lizcano	Relator	
		Juan Manuel Villamil Padilla	Correlator	
		Anyela Marcela Arenas Lara	Protocolante	
		Eduard Rodrigo Galvis González	Participante	
		Karen Yesenia Arias Romero	Participante	
10	Dimensionamiento: herramienta PVsyst	<b>Jueves 7 de mayo/2020</b>		
		Yeny Alejandra Ortiz Lizcano	Relator	
		Juan Manuel Villamil Padilla	Correlator	
		Anyela Marcela Arenas Lara	Protocolante	
		Eduard Rodrigo Galvis González	Participante	
		Karen Yesenia Arias Romero	Participante	

11	Descripciones técnicas del sistema fotovoltaico (aislado o conectado a la red)	<b>Lunes 11 de mayo/2020</b>		
		Juan Manuel Villamil Padilla	Relator	
		Eduard Rodrigo Galvis González	Correlator	
		Karen Yesenia Arias Romero	Protocolante	
		Yeny Alejandra Ortiz Lizcano	Participante	
Anyela Marcela Arenas Lara	Participante			
12	Presupuesto	<b>Lunes 25 de mayo/2020</b>		
		Anyela Marcela Arenas Lara	Relator	
		Yeny Alejandra Ortiz Lizcano	Correlator	
		Juan Manuel Villamil Padilla	Protocolante	
		Eduard Rodrigo Galvis González	Participante	
Karen Yesenia Arias Romero	Participante			
13	Comparación de las herramientas computacionales	<b>Lunes 13 de junio/2020</b>		
		Karen Yesenia Arias Romero	Relator	
		Eduard Rodrigo Galvis González	Correlator	
		Anyela Marcela Arenas Lara	Participante	
		Juan Manuel Villamil Padilla	Participante	
Yeny Alejandra Ortiz Lizcano	Protocolante			

**Apéndice B. Cumplimiento de los criterios de comparación en las herramientas computacionales seleccionadas**

Estos criterios son la recopilación de las funciones de las cuatro herramientas, los cuales están divididos en 3 tópicos generales: datos básicos, dimensionamiento y selección de equipos, simulación e informes.

➤ Datos básicos

Los datos básicos se dividen en: de formalidad (cliente y proyectista) e indispensables (información meteorológica y perfil de carga) en el dimensionamiento, a través de estos datos el proyectista puede tener una idea general del SFV. La siguiente Tabla presenta los criterios de comparación definidos que cumplen o no cada programa.

Criterios de comparación (Datos básicos)

Criterios		Solaris PV	PV*SOL	SAM	PVsys
<b>Información meteorológica</b>					
1	Permitir la ubicación en cualquier parte del globo terráqueo	✓	✓	✓	✓
2	Tener una base de datos mínimo de 10 años	✓	✓	✓	✓
3	Tener los parámetros mínimos (irradiación y temperatura)	✓	✓	✓	✓
<b>Información general</b>					
4	Información detalles del cliente	✓	✓	✗	✗
5	Información detalles del proyectista	✓	✓	✗	✗
6	Información detallada de la instalación	✓	✓	✗	✗
<b>Información del perfil de carga</b>					
7	Configurar los datos por horas, mes y año	✓	✓	✓	✓
8	Permitir el ingreso por estudio de cargas	✓	✓	✗	✓
9	Permitir el ingreso a partir de importación de perfiles	✓	✓	✗	✗

La siguiente Tabla muestra la cantidad de criterios cumplidos por cada software.

Criterios cumplidos	Solaris PV	PV*SOL	SAM	PVsyst
✓	9	9	4	5
✗	0	0	5	4

La Tabla anterior evidencia que Solaris PV y PV\*SOL cumplen todos los criterios de este tópico. Sin embargo, PVsyst y SAM solo cumplen con los criterios de la información meteorológica e información del perfil de carga, permitiendo el dimensionamiento del SFV, pero perdiendo valor en la formalidad.

➤ Dimensionamiento y selección de equipos

Este tópico involucra los componentes relacionados con: las ayudas en el dimensionamiento, diseño 3D y diagnóstico pre-informe.

Este tópico es importante para determinar la preferencia del software como ayuda al proyectista, debido a que el proceso de dimensionamiento cuenta con una cantidad representativa de cálculos y consideraciones. La siguiente Tabla presenta los criterios cumplidos por cada software.

Criterios de comparación (Dimensionamiento y selección de equipos)

Criterios		Solaris PV	PV*SOL	SAM	PVsyst
<b>Base de datos de equipos</b>					
1	Permitir el ingreso de equipos que no estén en la base de datos	✓	✓	✓	✓
2	Actualizar la base de datos por los fabricantes	✓	✓	✗	✓

3	Separar los equipos del SFV aislado del conectado a la red (inversor)	✗	✗	✗	✓
4	Integración de controladores/reguladores	✗	✗	✗	✓
<b>Ayudas en el dimensionamiento</b>					
5	Definir el tamaño del arreglo a partir de: uso energético, irradiación promedio anual o mensual, el peor valor de irradiación mensual durante el año y porcentaje de la demanda que debe satisfacer	✓	✓	✗	✗
6	Presentar el arreglo FV durante el dimensionamiento (escrito o gráfico)	✓	✓	✓	✓
7	Presentar el diagnóstico durante la selección de equipos (filtro de equipos preseleccionados por el software)	✗	✓	✗	✗
8	Revisar la compatibilidad de conexión eléctrica entre los equipos	✓	✓	✗	✓
9	Presentar las características eléctricas y físicas de los equipos dentro de la base de datos del software	✓	✓	✓	✓
10	Configurar los días de autonomía y baterías a utilizar	✓	✓	✗	✓
11	Ayudas audiovisuales y foros de preguntas a través de la plataforma del desarrollador	✓	✓	✗	✓
<b>Diseño 3D</b>					
12	Importar planos y archivos de estructuras diseñadas	✓	✓	✓	✓
13	Presentar de forma opcional el diseño 3D para el dimensionamiento	✗	✓	✓	✓
14	Calcular pérdidas por sombreado a partir de fotos	✓	✗	✗	✗
15	Insertar tipos de volumetría definidas por el software para el cálculo de sombreado	✓	✓	✓	✓
<b>Diagnóstico pre-informe</b>					
16	Entregar gráficas horarias	✓	✓	✗	✓
17	Entregar gráficas mensuales	✓	✓	✓	✓
18	Presentar el índice de rendimiento de la instalación	✗	✓	✓	✓
19	Entregar el valor de la energía inyectada a la red y de autoconsumo	✓	✓	✗	✓
20	Entregar el valor de la energía faltante en el SFV aislado	✗	✓	✗	✓

La siguiente Tabla muestra la cantidad de criterios cumplidos por cada software.

Criterios cumplidos	Solaris PV	PV*SOL	SAM	PVsyst
✓	14	17	8	17
✗	6	3	12	3

De la Tabla anterior se observa que los programas PV\*SOL y PVsyst cumplen con la mayor cantidad de criterios establecidos (17/20 y 17/20) en este tópico, en tercer lugar, está Solaris PV con (14/20) y por último SAM (8/20). PVsyst es el programa más completo en este tópico presentando más ayudas para facilitar su uso desde el punto de vista del proyectista. PV\*SOL es la herramienta más didáctica y visualmente atractiva para dimensionar SFV.

➤ Simulación e informes

La simulación es un parte muy importante en el dimensionamiento, ya que establece los periodos e intervalos para dar paso a resultados completos y confiables.

En los informes se presentan los resultados de la simulación, luego, se considera que esta información debe ser la más relevante e importante del proyecto para su posterior análisis de viabilidad y factibilidad por parte del proyectista. La siguiente Tabla presenta los criterios cumplidos por cada software.

Criterios de comparación (Simulación e informes)

Parámetros	Solaris PV	PV*SOL	SAM	PVsyst	
Simulación					
1	Simular un periodo mínimo de un año	✓	✓	✓	✓
2	Realizar la simulación con valores horarios	✓	✓	✓	✓
3	Entregar el “presupuesto” del proyecto	✓	✓	✓	✓
Informes entregados por cada software					
4	Entregar el diagrama general de pérdidas de energía	✗	✗	✓	✓
5	Entregar el valor de energía generada por el SFV	✓	✓	✓	✓

6	Entregar los datos técnicos del SFV (capacidad instalada, PR, energía generada, etc.)	✓	✓	✓	✓
7	Entregar los datos generales del SFV (geográficos y meteorológicos)	✓	✗	✗	✗
8	Entregar la verificación de conexión entre equipos	✓	✗	✗	✗

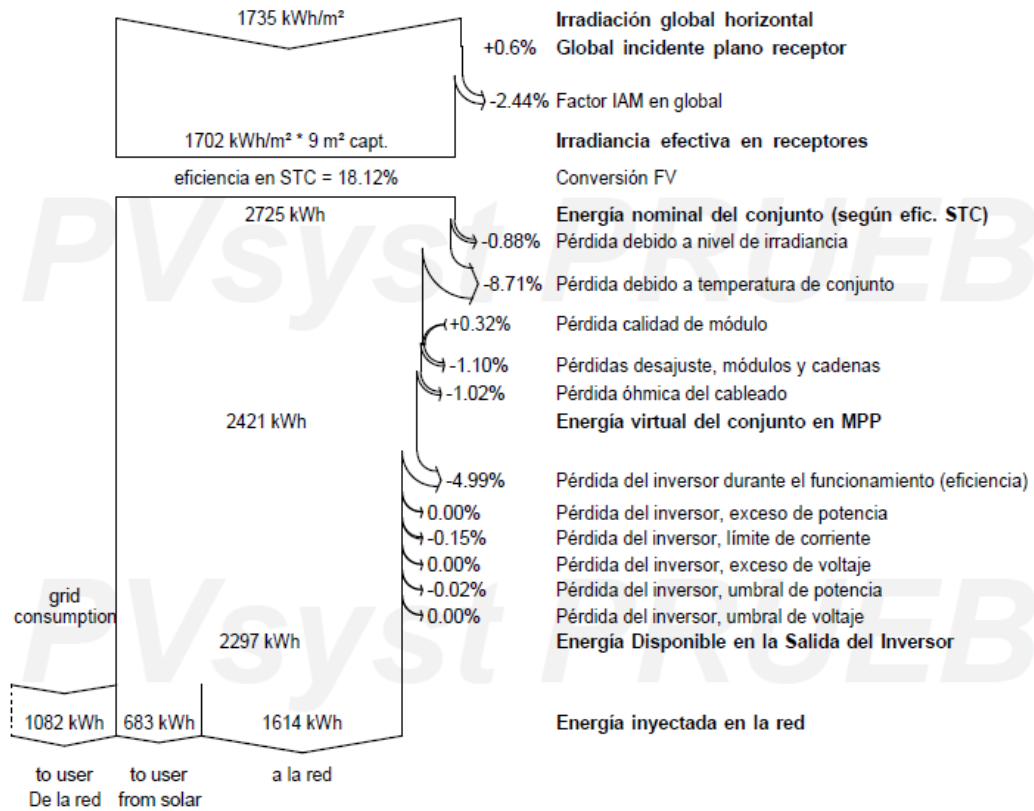
La siguiente Tabla presenta la cantidad de criterios cumplidos por cada software para simulación e informes.

Criterios cumplidos	Solaris PV	PV*SOL	SAM	PVsyst
✓	7	5	6	6
✗	1	3	2	2

De la Tabla anterior se observa que Solaris PV es el programa que cumple con la mayor cantidad de criterios establecidos (7/8) en este tópico, en segundo lugar, están PVsyst y SAM con (6/8) y por último PV\*SOL (5/8). A continuación, se concluyen las características de cada uno de estos.

- Todos los programas cuentan con la herramienta para realizar un costo aproximado del proyecto “presupuesto”.
- Solaris PV presenta una verificación de la conexión de los equipos, validando las conexiones eléctricas.
- PVsyst y SAM tienen a su favor la presentación del diagrama de pérdidas de energía de la simulación, el cual es de ayuda para el posterior análisis del proyectista (ver siguiente Figura).

Ejemplo de diagrama de pérdidas por PVsyst



**Apéndice C. Pérdidas consideradas por cada software**

La siguiente Tabla presenta las pérdidas consideradas en cada software. Estas no fueron modificadas por el seminario para el proceso de dimensionamiento, manteniendo los valores predeterminados por cada software.

Pérdidas consideradas por cada software

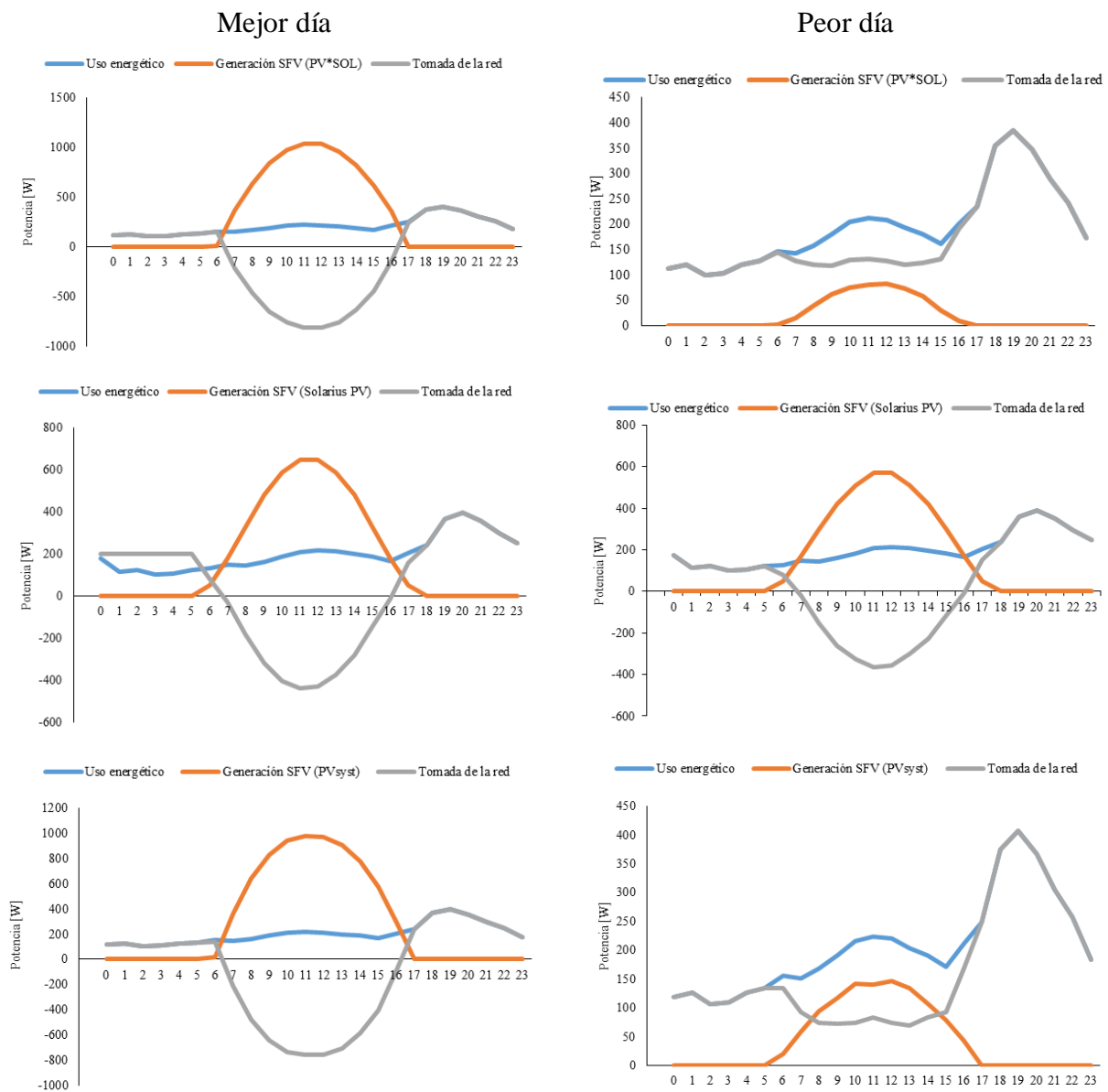
<b>Solaris PV</b>	<b>PV*SOL</b>	<b>SAM</b>	<b>PVsyst</b>
<b>Energía</b>			
- Ubicación (caída de nieve, superficies de agua, suelo, etc.) - Por reflexión - Por sombreado - Por temperatura	-Desviación del espectro estándar -Sombreado -Reflexión en la superficie del panel FV - Ensuciamiento -Conversión FV	-Sombreado -Ensuciamiento -Reflexión superficie del panel FV -Conversión FV	-Factor IAM global (reflexión sobre superficie del panel FV) -Conversión FV
<b>Panel FV</b>			
- Por temperatura - Circuitos DC - Por desajuste	- Rendimiento con luz débil - Desviación de la temperatura nominal - Diodos - Inadecuación (datos fabricante y conexión/sombreado)	- Generales -Diodos -Cableado DC	-Pérdida FV por nivel de irradiación -Pérdida FV por temperatura -Pérdida por calidad del panel FV -Pérdida óhmica del cableado
<b>Inversor</b>			
- Generales - Circuitos AC	- Potencia de arranque no alcanzada - Regulación por rango de tensión MPP -Regulación (corriente DC	-Eficiencia -Consumo nocturno -Cableado AC	-Eficiencia -Debido a potencia nominal -Debido a corriente máxima de entrada -Pérdida sobre voltaje nominal

	máxima, potencia DC máxima, potencia AC máxima) -Desviación de la tensión de entrada sobre la tensión nominal - Eficiencia - Consumo <i>standby</i> - Pérdidas totales de cableado		-Pérdida por umbral de potencia -Pérdida por umbral de voltaje -Consumo nocturno
<b>SA y controlador/regulador</b>			
- Pérdidas por almacenamiento de la batería	- Pérdidas por almacenamiento de la batería	- Pérdidas por almacenamiento de la batería	- Pérdidas de convertidor, eficiencia sobre carga - Pérdidas por almacenamiento de la batería

**Apéndice D. Operación diaria de los SFV dimensionados**

➤ Vivienda unifamiliar

Se presentan las figuras del mejor y peor día de desempeño energético simulado para PV\*SOL, Solarius PV y PVsyst respectivamente.

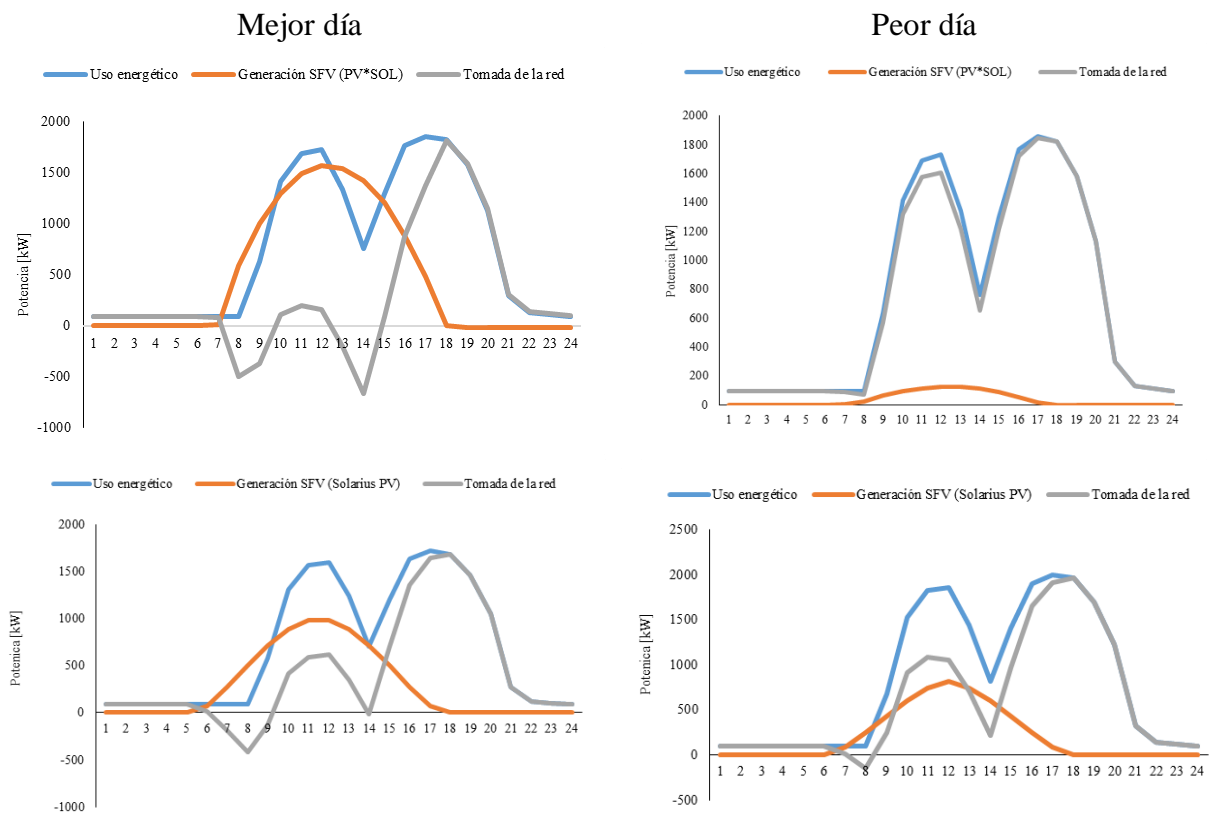


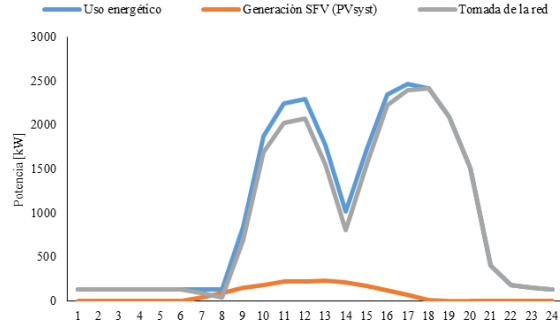
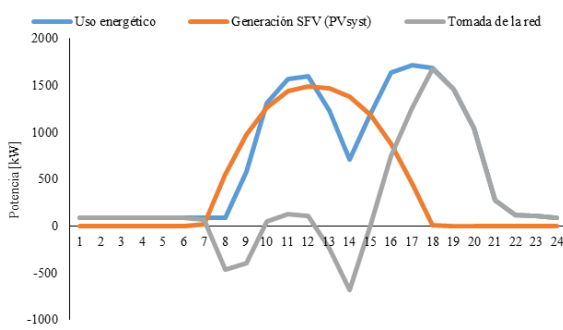
Fecha y energía del mejor y peor día de simulación.

	Mejor día de simulación	Energía simulada [kWh]	Peor día de simulación	Energía simulada [kWh]
<b>PV*SOL</b>	12 – enero	7,65	24 – abril	0,52
<b>Solarius PV</b>	7 – enero	4,56	7 – noviembre	4,04
<b>PVsyst</b>	24 – enero	7,88	22 – mayo	1,08

➤ UIS

Se presentan las figuras del mejor y peor día de desempeño energético simulado para PV\*SOL, Solarius PV y PVsyst respectivamente.



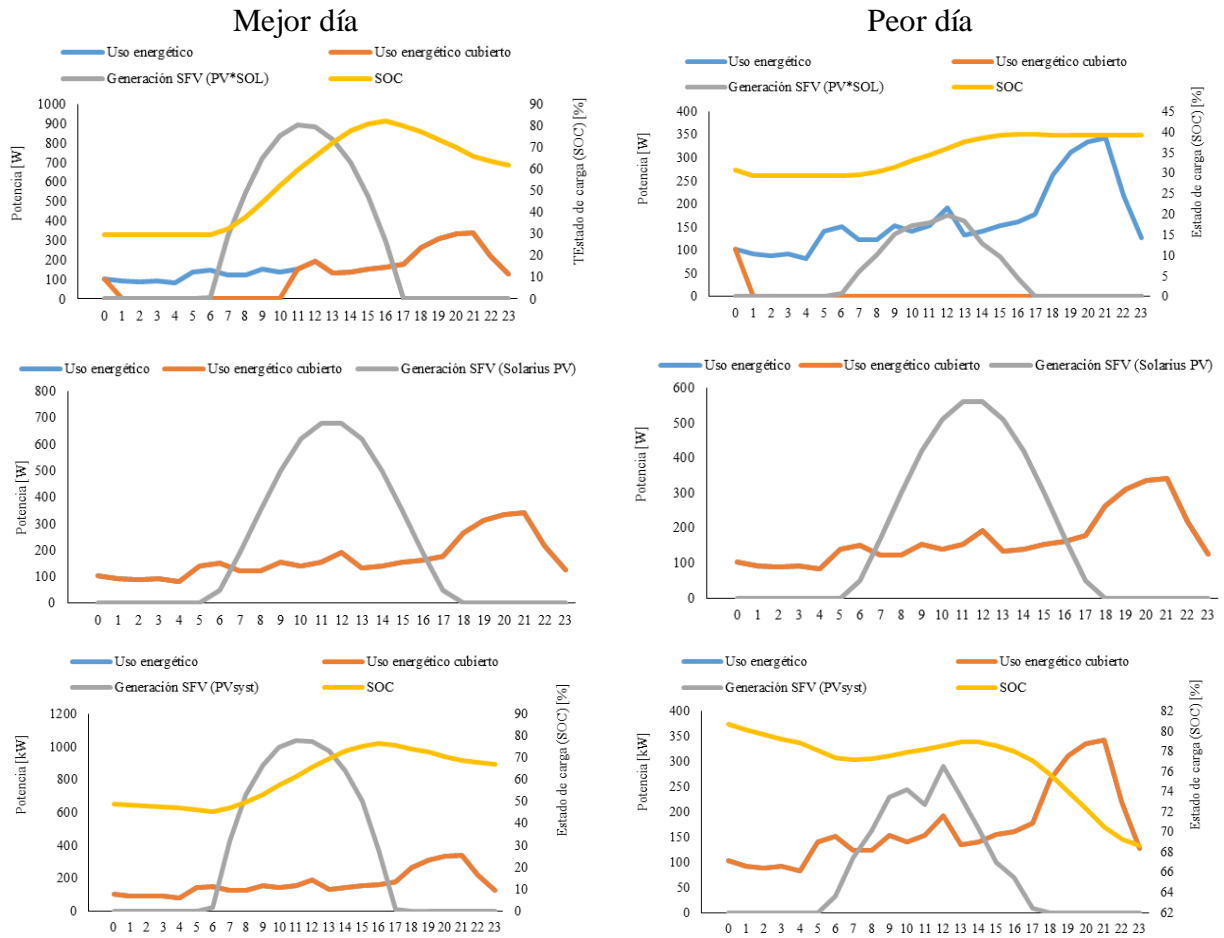


Fecha y energía del mejor y peor día de simulación.

	Mejor día de simulación	Energía simulada [MWh]	Peor día de simulación	Energía simulada [MWh]
<b>PV*SOL</b>	4 – enero	11,51	24 – abril	0,81
<b>Solarius PV</b>	7 – febrero	6,87	24 – abril	5,03
<b>PV*syst</b>	4 – enero	11,13	22 – mayo	1,66

➤ Finca residencial

Se presentan las figuras del mejor y peor día de desempeño energético simulado para PV\*SOL, Solarius PV y PV\*syst respectivamente

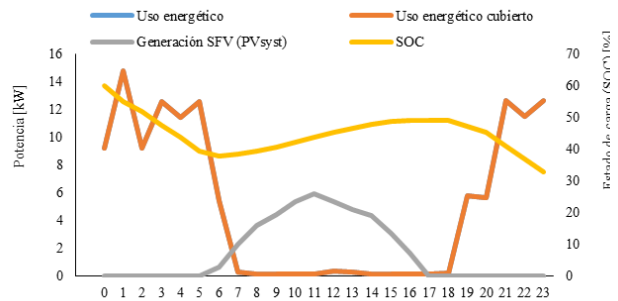
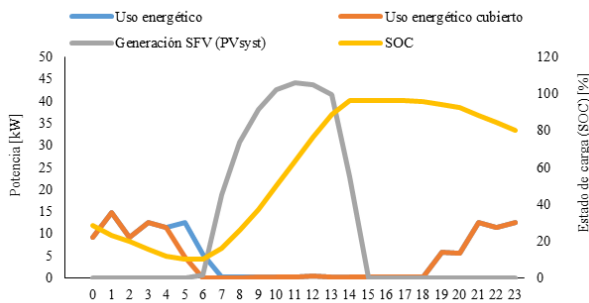
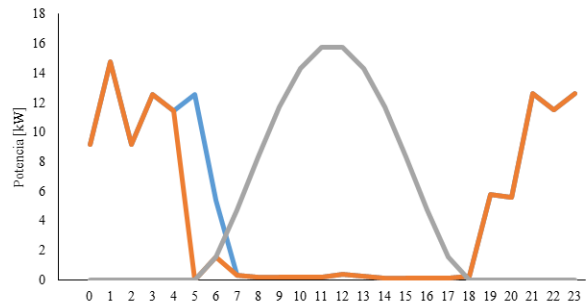
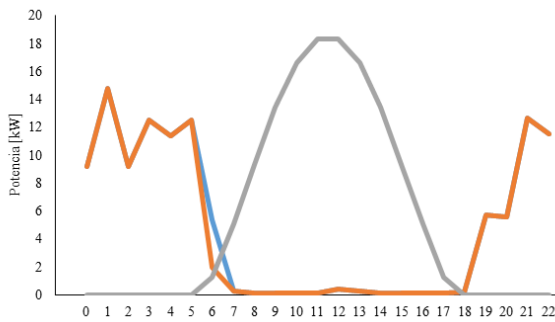
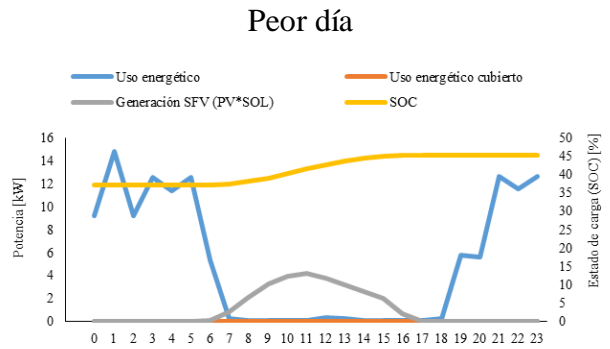
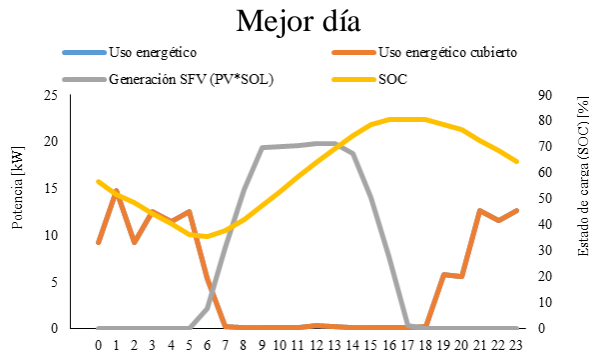


Fecha y energía del mejor y peor día de simulación.

	Mejor día de simulación	Energía simulada [kWh]	Peor día de simulación	Energía simulada [kWh]
<b>PV*SOL</b>	2 – enero	6,55	11 – mayo	1,17
<b>Solarius PV</b>	7 – enero	4,78	7 – abril	4,02
<b>PVsyst</b>	3 – enero	7,98	16 – mayo	1,66

➤ Finca agropecuaria

Se presentan las figuras del mejor y peor día de desempeño energético simulado para PV\*SOL, Solarius PV y PVsyst respectivamente.



Fecha y energía del mejor y peor día de simulación.

	<b>Mejor día de simulación</b>	<b>Energía simulada [kWh]</b>	<b>Peor día de simulación</b>	<b>Energía simulada [MWh]</b>
<b>PV*SOL</b>	31– marzo	164,66	30 – abril	26,95
<b>Solaris PV</b>	7 – enero	128,3	7– abril	112,7
<b>PVsyst</b>	4 – enero	283,11	3 – abril	41,48